



João Bernardo Nunes Carreira

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de
Computadores

Infraestrutura para *Smart Photovoltaics*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor João Miguel Murta Pina, FCT-UNL

Coorientador: Professor Doutor João Pedro Oliveira, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professor Doutor Paulo da Costa Luís da Fonseca Pinto

Arguente: Professor Doutor Nuno Filipe Silva Veríssimo Paulino

Vogal: Professor Doutor João Miguel Murta Pina

Setembro, 2017



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Infraestrutura para *Smart Photovoltaics*

Copyright © João Bernardo Nunes Carreira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À memória do meu avô José Nunes...

Dado o infortúnio da vida, não estive presente nesta fase da minha vida.

Agradecimentos

Serve este capítulo para expressar os meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram tanto para a realização do curso como da presente dissertação.

Primeiramente pretendo agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Murta Pina e coorientador, Professor Doutor João Pedro Oliveira, pelo apoio, prontidão e dedicação que sempre mostraram durante a realização da dissertação, o que permitiu alcançar os resultados pretendidos de forma satisfatória.

O apoio da minha família foi fundamental nesta fase, pelo apoio e motivação que me dedicaram e que me permitiu alcançar os meus objetivos académicos e pessoais e possibilitaram este grande passo para a minha vida profissional.

Um agradecimento especial à minha namorada, Catarina Henriques, por toda a paciência que demonstrou durante estes cinco anos, sempre presente a meu lado nos bons e maus momentos, revelando-se num pilar fundamental na minha vida.

Não esquecendo os meus amigos, Daniel Oliveira, Fábio Roldão, João Pereira André Afoito e Tiago Santos pois sempre se revelaram verdadeiros amigos e com os quais partilhei momentos inesquecíveis.

Por último, não posso deixar de agradecer aos meus colegas de curso, João Gomes, João Pombas, João Pacheco, João Francisco Gomes, João Morais e Tomás Deus, que estiveram sempre presentes neste percurso, com os quais partilhei os melhores momentos desta etapa da minha vida.

Resumo

Por todo o mundo ocorre uma intensiva extração de combustíveis fósseis que está a levar à exaustão de recursos não renováveis, para além da poluição provocada pela sua utilização. Estes acontecimentos motivam a procura por tecnologias que permitam converter energia de forma sustentável, através de energia solar, atómica ou geração eólica entre outras.

Atualmente, a energia elétrica é imprescindível para a maioria das pessoas no seu quotidiano, o que está a provocar um crescimento do consumo energético e a conduzir a uma progressiva transformação no mercado da energia, graças ao aumento do número de pequenas unidades de geração diretamente ligadas à rede elétrica, baseadas em diferentes tecnologias. Uma destas tecnologias é a geração fotovoltaica. Com este avanço surge a necessidade de dotar os sistemas de capacidades de análise e decisão que permitam uma otimização do desempenho e manutenção do sistema. É nesta perspetiva que se introduz os sistemas ciberfísicos e ambientes de partilha de informação. Num sistema fotovoltaico, tal como noutros sistemas, é extremamente importante conhecer tanto os parâmetros de entrada como os de saída para conseguir caracterizar eficientemente o sistema.

Esta dissertação surge na ótica de integração de capacidades computacionais em processos físicos e partilha de informação, através de utilização de sensores e microcontroladores para aquisição e gestão de dados de um módulo fotovoltaico e a respetiva disponibilização num servidor online.

Palavras-chave: *Internet of Things*, Monitorização, Sistemas ciberfísicos, Sistemas fotovoltaicos, *Smart Photovoltaics Systems*.

Abstract

Throughout the world there is an extensive extraction of fossil fuels that is leading to the exhaustion of non-renewable resources, in addition to the pollution caused by their use. These events motivate the search for technologies that allow to generate energy in a sustainable way, through solar and atomic energy, wind generation and others.

Currently, electricity is essential for most people in their daily lives, which is leading to an increase in energy consumption and leading to a progressive transformation in the energy market, thanks to the increase in the number of small generation units directly linked to the grid, based on different technologies. One of these technologies is photovoltaic generation. With this advance, the need arises to equip the systems with analysis and decision capabilities that allow an optimization of the performance and maintenance of the system. It is in this perspective that cyber-physical systems and information sharing environments are introduced. In a photovoltaic system, as in other systems, it is extremely important to know both the input and output parameters to efficiently characterize the system.

This dissertation arises from the perspective of integrating computational capacities into physical processes and information sharing using sensors and microcontrollers for data acquisition and management of a photovoltaic module and the respective availability in an online server.

Keywords Internet of Things, Monitoring, Cyber-Physical Systems, Photovoltaic Systems, Smart Photovoltaics Systems.

Índice Geral

ACRÓNIMOS	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 CONTRIBUIÇÕES ORIGINAIS	2
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 ARQUITETURA GENÉRICA CPS (CYBER-PHYSICAL SYSTEMS).....	5
2.1.1 <i>Sistemas ciberfísicos</i>	6
2.1.2 <i>Aplicações</i>	7
2.1.3 <i>Arquiteturas</i>	8
2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTELIGENTES (SMART PV)	12
2.2.1 <i>Sistemas fotovoltaicos</i>	12
2.3 MONITORIZAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	22
2.3.1 <i>Aquisição e monitorização de dados</i>	24
2.4 SENSORES	25
2.5 CONTROLADORES	27
2.6 TRABALHOS DESENVOLVIDOS NO ÂMBITO DE MONITORIZAÇÃO DE SISTEMAS.....	31
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
3 SMART PV: ARQUITETURA	37
3.1 MODELO CONCEPTUAL	37
3.2 APLICAÇÃO EM SMART PV	41
4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA.....	45
4.1 DESCRIÇÃO DA INFRAESTRUTURA PARA SMART PV	45
4.2 SENSORES	47
4.2.1 <i>Temperatura</i>	47

4.2.2	<i>Irradiância</i>	47
4.2.3	<i>Corrente e tensão</i>	48
4.3	MICROCONTROLADORES	49
4.3.1	<i>ATtiny85</i>	49
4.3.2	<i>PSoC 5LP - CY8C5888LTI-LP097</i>	50
4.3.3	<i>ESP32 Thing</i>	50
4.4	COMUNICAÇÃO ENTRE MICROCONTROLADORES	50
4.5	GESTÃO E ENVIO DE DADOS	52
4.6	DESENVOLVIMENTO DAS PLACAS DE TESTE	53
5	PROCEDIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS	59
5.1	PROCESSAMENTO E CALIBRAÇÃO.....	59
5.2	RESULTADOS.....	65
6	CONCLUSÕES	73
6.1	SINOPSE.....	73
6.2	TRABALHO FUTURO	75
	REFERÊNCIAS	77
	ANEXOS	81

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 – ARQUITETURA CPS DE DUAS CAMADAS, ADAPTADO DE (SHI ET AL., 2011)	6
FIGURA 2.2 - ARQUITETURA CPS DE TRÊS CAMADAS, ADAPTADO DE (HU ET AL., 2012).	9
FIGURA 2.3 - ARQUITETURA CPS BASEADA EM SOA, ADAPTADO DE (HU ET AL., 2012).	10
FIGURA 2.4 - ARQUITETURA 5C PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CPS, ADAPTADO DE (LEE, BAGHERI AND KAO, 2015)	11
FIGURA 2.5- CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.	12
FIGURA 2.6 - SISTEMA AUTÓNOMO.	13
FIGURA 2.7 - SISTEMA LIGADO À REDE.....	13
FIGURA 2.8 - SISTEMA HÍBRIDO.....	14
FIGURA 2.9 - ESTRUTURA DE UM CRISTAL DE SILÍCIO, ADAPTADO DE (LOBERA, 2011).	15
FIGURA 2.10 - ESTRUTURA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA, ADAPTADO DE (LOBERA, 2011).	16
FIGURA 2.11 - MODELO EQUIVALENTE DETALHADO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA, ADAPTADO DE (CASTRO, 2002).....	17
FIGURA 2.12 - CÉLULAS LIGADAS EM SÉRIE.....	18
FIGURA 2.13 – TENSÃO E CORRENTE EM CÉLULAS LIGADAS EM SÉRIE.....	19
FIGURA 2.14 - MÓDULO FOTOVOLTAICO SOMBREADO, COM INTRODUÇÃO DE DÍODOS DE DERIVAÇÃO, RETIRADO DE (FREITAS, 2008).....	20
FIGURA 2.15 - COMPOSIÇÃO DE DUAS FILEIRAS FOTOVOLTAICAS, LIGADAS EM PARALELO.	20
FIGURA 2.16 - LIGAÇÃO DA INSTALAÇÃO À REDE, POR MEIO DE UM CONVERSOR DC/AC (INVERSOR).	21
FIGURA 2.17 – INVERSOR FOTOVOLTAICO DA ABB.	22
FIGURA 2.18 - CLOUD CONNECT ADVANCED.	23
FIGURA 2.19 - TRANSCLINIC, MODELO 8I+.....	23
FIGURA 2.20 - SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO, PV-SCTL16.	24
FIGURA 2.21 - POSSÍVEL ARQUITETURA DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS, ADAPTADO DE (CRISTALDI, FAIFER AND LAZZARONI, 2016)	25
FIGURA 2.22 - ARQUITETURA DE UMA REDE DE SENSORES, ADAPTADO DE (AKYILDIZ ET AL., 2010).	26
FIGURA 2.23 - POSIÇÃO DOS SENSORES NA MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO, RETIRADO DE (IEC, 2009).....	27
FIGURA 2.24 - MSP430 LAUNCHPAD.	28
FIGURA 2.25 - DIAGRAMA DE BLOCOS DA VERSÃO MSP430FR2433, RETIRADO DE (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).	28
FIGURA 2.26 - CY8CKIT-059 PSoC® 5LP.	29

FIGURA 2.27 - ARQUITETURA PSOC, RETIRADO DE (CYPRESS, 2017).....	30
FIGURA 2.28 - ARDUINO UNO.....	30
FIGURA 2.29 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO ATMEGA, RETIRADO DE (ATMEL, 2015).	31
FIGURA 2.30 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO DE UMA INSTALAÇÃO FOTOVOLTAICA COM BATERIAS, ADAPTADO DE (MUJUMDAR AND TUTKANE, 2013).....	33
FIGURA 2.31 – ARQUITETURA PROPOSTA NESTE PROJETO, ADAPTADO DE (PAPAGEORGAS ET AL., 2013).	34
FIGURA 2.32 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO MEDIDOR INTELIGENTE, ADAPTADO DE (KUZLU ET AL., 2011).	35
FIGURA 3.1 - MODELO ARQUITETURAL.	38
FIGURA 3.2 - REPRESENTAÇÃO DE UM DAAS.	39
FIGURA 3.3 - FLUXOGRAMA DO CONCEITO APRESENTADO.	40
FIGURA 3.4 - REPRESENTAÇÃO DO CONCEITO PROPOSTO.	41
FIGURA 4.1 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DESENVOLVIDO.	46
FIGURA 4.2 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SENSOR DS18B20, RETIRADO DE (MAXIM INTEGRATED, 2015).	47
FIGURA 4.3 – DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DO SENSOR TSL235, RETIRADO DE (TEXAS SOLUTIONS, 2017).	48
FIGURA 4.4 – DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAL DO SENSOR ACS712, RETIRADO DE (ALLEGRO MICROSYSTEMS, 2017). .	49
FIGURA 4.5 - ESQUEMA DE COMUNICAÇÃO I ² C.	52
FIGURA 4.6 - PROTOCOLO UTILIZADO NO ENVIO DE DADOS.....	53
FIGURA 4.7 - MONTAGEM UTILIZADA NAS EXPERIÊNCIAS.....	54
FIGURA 4.8 - PROTÓTIPO DESENVOLVIDO EM PCB.	55
FIGURA 4.9 – CIRCUITO DE POTÊNCIA DO PROTÓTIPO.....	55
FIGURA 4.10 - CONETORES DE LIGAÇÃO AO MÓDULO E À CARGA.	56
FIGURA 4.11 – CONETORES DE LIGAÇÃO AOS SENSORES.	56
FIGURA 4.12 - PROTÓTIPO FINAL	57
FIGURA 5.1 – IRRADIÂNCIA, CURVA EXPERIMENTAL.....	61
FIGURA 5.2 - FREQUÊNCIA DE SAÍDA EM FUNÇÃO DA IRRADIÂNCIA, ADAPTADO DE (TEXAS SOLUTIONS, 2017).	61
FIGURA 5.3 - MÉTODO UTILIZADO PARA O CÁLCULO DA IRRADIÂNCIA, ADAPTADO DE (TEXAS SOLUTIONS, 2017).	62
FIGURA 5.4 - DIVISOR DE TENSÃO.....	63
FIGURA 5.5 - IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE ESTUDO NO MÓDULO.....	66
FIGURA 5.6 - COMPARAÇÃO ENTRE A TEMPERATURA TEÓRICA DAS CÉLULAS E A TEMPERATURA EXPERIMENTAL.....	67
FIGURA 5.7 - TEMPERATURA DAS CÉLULAS, COM SOMBREAMENTO DE T1.	68
FIGURA 5.8 - COMPORTAMENTO DA CORRENTE COM SOMBREAMENTO DA POSIÇÃO 1.....	69
FIGURA 5.9 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO COM SOMBREAMENTO DA POSIÇÃO 1.	69
FIGURA 5.10 - VARIAÇÃO DA CURVA I-V PARA DIFERENTES TEMPERATURAS, RETIRADO DE (KYOCERA).....	70
FIGURA 5.11 - VARIAÇÃO DA CURVA I-V PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE IRRADIÂNCIA, RETIRADO DE (KYOCERA).....	70
FIGURA 5.12 - GRÁFICO DE DISPERSÃO DA CORRENTE EM FUNÇÃO DA TENSÃO.....	71
FIGURA 5.13 – IMAGEM ILUSTRATIVA DA LIGAÇÃO ENTRE O PROTÓTIPO, O MÓDULO PV, CARGA E SENSORES.	71

Índice de Tabelas

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE ATUAL INDÚSTRIA E INDÚSTRIA 4.0, ADAPTADO DE (BAGHERI ET AL., 2015)	7
---	---

Acrónimos

Simbologia

AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AFE	<i>Analog Front End</i>
CC	<i>Cloud Computing</i>
CPS	<i>Cyber Physical Systems</i>
DaaS	<i>Data as a Service</i>
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>
DAQ	<i>Data Acquisition System</i>
DC	<i>Direct Current</i>
E_g	Hiato Energético
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MID	<i>Mobile Internet Device</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>

PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PV	<i>Photovoltaic</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
R_p	Resistência paralelo
R_s	Resistência série
SOA	<i>Service-Oriented Architecture</i>
SOC	<i>System On Chip</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

Introdução

Este capítulo introduz o trabalho realizado, numa perspetiva de perceber qual a motivação que leva ao seu desenvolvimento, os principais objetivos que se propõe atingir e enquadrar a relevância e a contribuição inovadora deste projeto no panorama energético e de sistemas ciberfísicos. Por último é apresentada a estrutura da dissertação, que permitirá elucidar o leitor do trabalho desenvolvido.

1.1 Motivação

O avanço da tecnologia levou ao desenvolvimento de sistemas dotados de inteligência, ou seja, sistemas capazes de perceber e decidir quais as ações mais adequadas a executar. Os CPS (*Cyber-Physical Systems*) são sistemas que integram processos de computação e processos físicos. Devido às suas arquiteturas permitem tornar os sistemas mais eficientes devido às suas capacidades de auto consciência e adaptabilidade. O aparecimento da tecnologia IoT (*Internet Of Things*) permitiu melhorar os sistemas a nível de desempenho, monitorização e manutenção pois é criado um ambiente de partilha de informação que facilita a comunicação entre equipamentos. É nesta perspetiva de capacitar um sistema de conhecimento próprio e com aptidão para tomar decisões que surge o trabalho aqui desenvolvido.

A motivação presente na elaboração desta dissertação passa pela necessidade de facilitar o acesso a parâmetros essenciais na caracterização de um qualquer sistema, levando a uma otimização tanto a nível de tempo, como a nível de desempenho. Esta necessidade requer o desenvolvimento de um equipamento que possa ser integrado no sistema estudado, como por exemplo um sistema fotovoltaico, e forneça os dados pretendidos pelo utilizador. A obtenção de

dados revela-se importante não só no âmbito dos sistemas fotovoltaicos, como para quaisquer outros sistemas que possam ser monitorizados, como parques de estacionamento e equipamentos domésticos.

Este projeto foi desenvolvido em parceria com a empresa CQS R&D que propôs o tema. Um agradecimento especial ao Eng. Carlos Simão pela oportunidade que me concedeu em participar neste projeto e pelo acompanhamento e prontidão durante todo este processo.

1.2 Objetivos

Com o desenvolvimento deste projeto, pretende-se desenvolver uma infraestrutura para monitorização de um módulo fotovoltaico, num paradigma de CPS e IoT, dotado de:

- Sensores, que permitam adquirir dados sobre a condição do módulo (tensão, corrente e temperatura);
- Transformação de informação (dados recolhidos) em conhecimento e inferir acerca do desempenho do módulo;
- Arquitetura flexível;
- Capacidades de comunicação que permitam ligação a outros dispositivos e sistemas IoT.

1.3 Contribuições originais

Os equipamentos de monitorização de sistemas fotovoltaicos, apresentados no Capítulo 2, adquirem os dados necessários para uma avaliação do comportamento do módulo fotovoltaico associado, em termos de tensão, corrente, mas também temperatura, humidade, níveis de bateria e valor da carga a que está ligado. Ao contrário destes, neste equipamento optou-se por desenvolver uma arquitetura flexível que permita a sua utilização tanto para sistemas fotovoltaicos como também para áreas distintas, como monitorização de parques de estacionamento.

Relativamente aos sistemas apresentados no Capítulo 2, este sistema oferece um maior conhecimento do módulo, pela leitura da temperatura das células que pode ser comparada com a temperatura teórica das células de acordo com aos valores de irradiância e temperatura ambiente medidos e que pode levar a uma identificação mais rápida de um eventual problema.

O trabalho desenvolvido originou a publicação do seguinte artigo científico:

Murta Pina, J., Oliveira, J., Carreira, J., Pacheco, J., Simão, C., Carlos, B., Esquetim, V., “Smart Photovoltaic Systems: A cyber-physical systems/IoT approach: architecture, implementation and pilot description”, Proc. of the International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/IEEE ITMC Conference, Madeira, Portugal, June 2017.

1.4 Estrutura da dissertação

Capítulo 2 **Estado da Arte**: Capítulo onde é feita a revisão bibliográfica do tema abordado na presente dissertação. São apresentados conceitos fundamentais no decorrer do projeto, como CPS e IoT, as suas arquiteturas e aplicações. É evidenciada a sua influência nos sistemas fotovoltaicos e apresentados trabalhos que se enquadram neste contexto. Este capítulo é dividido em:

2.1 **Arquitetura genérica CPS (*Cyber-Physical Systems*)**: é apresentada a definição dos sistemas CPS e a estrutura base destes sistemas. São evidenciadas as diferentes arquiteturas propostas para estes sistemas, bem como algumas das suas aplicações.

2.2 **Sistemas fotovoltaicos inteligentes (*Smart PV*)**: é introduzido o conceito de IoT e *Smart PV* nos sistemas fotovoltaicos, e apresentada, de forma detalhada, qual a constituição típica de um sistema fotovoltaico e os processos físicos associados.

2.3 **Monitorização de sistemas fotovoltaicos**: é efetuado um estudo sobre os sistemas de monitorização, nomeadamente os componentes requeridos e alguns dos equipamentos já disponíveis de mercado. É também feita uma abordagem nos sistemas de aquisição de dados e a sua relação com os sistemas de monitorização de dados.

2.4 **Sensores**: é referida a utilidade dos sensores, como são formadas as redes de sensores e as suas características e indicadas algumas aplicações.

2.5 **Controladores**: são apresentados alguns dos controladores mais utilizados na análise e processamento de dados, nomeadamente, MSP, PSoC e Arduino.

2.6 **Trabalhos desenvolvidos no âmbito de monitorização de sistemas**: são apresentados trabalhos que se assemelham com o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

2.7 **Considerações finais**: são efetuadas algumas considerações/conclusões acerca da revisão bibliográfica efetuada neste capítulo.

Capítulo 3 ***Smart PV*: Arquitetura**: neste capítulo é identificado o modelo arquitetural presente neste projeto e estabelecida uma ligação com a sua aplicação nos sistemas fotovoltaicos

inteligentes. É apresentado o modelo conceptual proposto nesta dissertação e a respetiva arquitetura e identificada a aplicação do modelo nos sistemas fotovoltaicos inteligentes.

Capítulo 4 **Implementação do sistema:** contém a descrição do sistema implementado na dissertação, apresentando detalhadamente os vários módulos integrados. Reparte-se nos seguintes subcapítulos:

4.1 **Descrição da Infraestrutura para *Smart PV*:** compreende a descrição global do sistema implementado, referindo-se as estratégias utilizadas e o seu modo de funcionamento.

4.2 **Sensores:** São identificados os sensores utilizados no estudo de cada parâmetro.

4.3 **Microcontroladores:** são apresentados os microcontroladores responsáveis pela gestão e tratamento de dados.

4.4 **Comunicação entre microcontroladores:** descreve-se a estratégia praticada na comunicação entre microcontroladores.

4.5 **Gestão e envio de dados:** apresentado o modo de envio dos dados para o servidor.

4.6 **Desenvolvimento das placas de teste:** são apresentados os passos para o desenvolvimento de protótipo.

Capítulo 5 **Procedimento e análise de resultados:** inicialmente são identificados os procedimentos experimentais para a calibração dos sensores que compõem o sistema, e por fim apresentados os resultados utilizados na validação do sistema implementado.

Capítulo 6 **Conclusões:** neste capítulo são apresentadas conclusões acerca do trabalho desenvolvido, originando também o Subcapítulo 6.2, no qual são referidos possíveis melhoramentos com o intuito de otimizar a infraestrutura.

2 Estado da Arte

Este capítulo destina-se à revisão bibliográfica do tema tratado neste projeto. Será efetuada uma descrição sobre os conceitos dos sistemas ciber-físicos e do paradigma de IoT, bem como os seus papéis no desenvolvimento de sistemas inteligentes.

Nas últimas décadas, com o rápido desenvolvimento da ciência, tecnologia e engenharia, têm surgido novos conceitos, como CPS (*Cyber-Physical Systems*) e IoT (*Internet of Things*) que englobam processos físicos com comunicação e *software*, dotando os sistemas de uma abstração, técnicas de modelização e análise (Shi *et al.*, 2011). Uma vez que a tecnologia tem-se desenvolvido rapidamente, é importante realizar um estudo mais aprofundado sobre as tecnologias já existentes nesta área, as suas arquiteturas e o seu papel nos sistemas fotovoltaicos inteligentes (*Smart PV*), foco deste trabalho.

2.1 Arquitetura genérica CPS (*Cyber-Physical Systems*)

As interações entre computadores, redes e sistemas físicos são constantemente alteradas com o aparecimento de novas formas de tecnologia. A tecnologia está presente nas mais diversas áreas, como sistemas integrados, computadores, comunicações, e o próprio *software* integrado nos sistemas de computação, como carros, dispositivos médicos, instrumentos científicos e sistemas inteligentes de transportes (Shi *et al.*, 2011).

Numa primeira fase, os CPS adotam uma estrutura de duas camadas, representada na Figura 2.1, a camada física e a camada de computação. A parte física consiste no ambiente físico

envolvido, como a recolha de dados e a execução das decisões inerentes à unidade de computação. A unidade de computação analisa e processa os dados provenientes da parte física de forma a tomar uma decisão (Hu *et al.*, 2012).

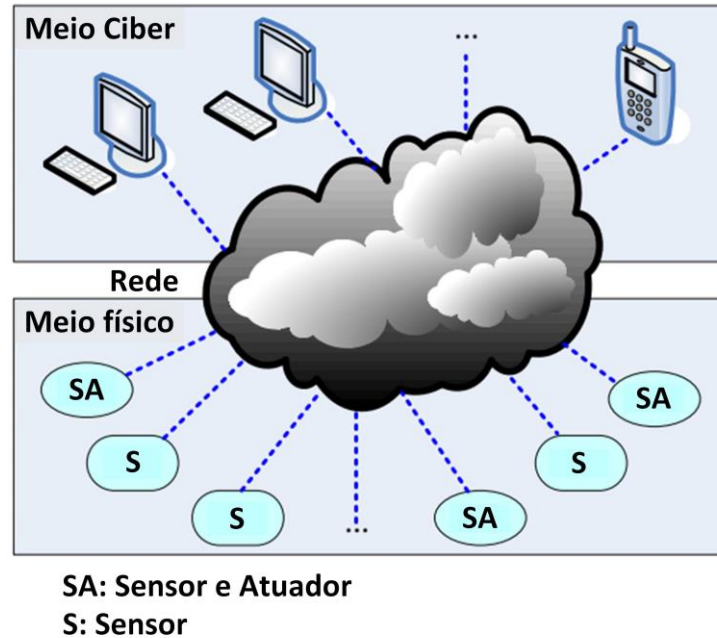


Figura 2.1 – Arquitetura CPS de duas camadas, adaptado de (Shi *et al.*, 2011)

2.1.1 Sistemas ciberfísicos

Um sistema ciberfísico é definido como a integração da computação em processos físicos. Nos CPS, existem dispositivos que executam processos físicos sob monitorização e controlo de entidades computacionais. Neste panorama, os dispositivos físicos podem expor as suas funcionalidades devido à sua capacidade de ligação à internet. Para além dos diferentes tipos de sensores e atuadores, um dispositivo portátil MID (Mobile Internet Device), pode ser considerado como um tipo de dispositivo físico neste contexto de CPS (La and Kim, 2010).

Em geral, um CPS apresenta dois aspetos principais: (1) uma conectividade avançada que assegura aquisição de dados, em tempo real, do mundo físico e um *feedback*, do ciberespaço, sobre a informação; (2) gestão inteligente de dados, capacidades computacionais e análise que constituem o ciberespaço (Lee, Bagheri and Kao, 2015).

A integração dos sistemas ciberfísicos na produção, logística e serviços permite dotar as empresas de máquinas auto conscientes, auto adaptáveis e com perceção da informação numa ótica de produção inteligente. Estas características podem transformar a atual indústria numa

Indústria 4.0 com um grande potencial económico. A Indústria 4.0 é um termo introduzido pela Siemens e refere-se à integração de sistemas interligados, conhecida como a quarta revolução industrial (Bagheri *et al.*, 2015). Na Tabela 1 faz-se uma comparação entre o panorama da atual indústria e o da Indústria 4.0.

Tabela 1 – Comparação entre atual indústria e Indústria 4.0, adaptado de (Bagheri *et al.*, 2015)

Fonte de Dados		Industria atual		Indústria 4.0	
		Atributos	Tecnologias	Atributos	Tecnologias
Componente	Sensor	Precisão	Sensores inteligentes e deteção de falhas	Auto consciente Autodidata	Monitorização da degradação e previsão do tempo de vida útil restante
Máquina	Controlador	Produtibilidade e desempenho	Monitorização por condição e diagnóstico	Auto consciente Autodidata Auto comparação	Aumento do tempo de vida com a monitorização do seu estado
Sistema de produção	Sistema interligado	Produtividade e OEE	Trabalho e redução de desperdício	Autoconfiguração Auto manutenção Auto-organização	Produtividade sem preocupações

2.1.2 Aplicações

Os sistemas ciberfísicos podem ser usados numa vasta gama de aplicações, como transportes inteligentes, maior precisão na agricultura, área medicinal e aeroespacial e monitorização de água.

A medicina baseada em CPS tem potencial para substituir os equipamentos de medicina tradicional. Com a utilização de sensores e redes, vários equipamentos podem trabalhar em conjunto para detetar, em tempo real, a condição física do paciente, como é o caso dos pacientes com doenças cardíacas. Dispositivos portáteis, transportados pelos pacientes, podem detetar a condição a qualquer altura e enviar sinais de aviso ou previsão. Assim como na medicina, a agricultura pode ser mais precisa, baseando-se em sistemas de informação para implementar uma variedade de estratégias e/ou tecnologias modernas na gestão das culturas. O projeto deste tipo de agricultura inclui, gestão de dados de experiências de produção, informações geográficas acerca dos terrenos e informações climáticas. A indústria dos transportes também pode ser influenciada neste contexto, o sistema de gestão dos transportes deve ser feito em tempo real, de forma eficiente e precisa. Com as tecnologias mais modernas, como computadores, sensores e redes de informação, estes sistemas de gestão tornam-se cada vez mais inteligentes (Hu *et al.*, 2012).

2.1.3 Arquiteturas

As características dos CPS, como análise em tempo real, distribuição, confiabilidade, apresentam uma série de desafios na fase de projeto e implementação de um sistema ciberfísico.

Em (La and Kim, 2010) apresenta-se uma arquitetura CPS de três camadas, Figura 2.2, camada ambiental (*environmental tier*), camada de serviço (*service tier*) e camada de controlo (*control tier*).

- A **camada ambiental** consiste nos equipamentos físicos e no ambiente alvo. Inclui a utilização, pelos utilizadores, dos dispositivos e do ambiente a eles associado;
- A **camada de serviço** é o ambiente típico de computação com serviços em SOA (Service-Oriented Architecture), onde as funcionalidades das aplicações são disponibilizadas na forma de serviços, e CC (Cloud Computing) que utiliza capacidade de armazenamento via internet;
- A **camada de controlo** recebe os dados enviados pelos sensores, toma decisões de controlo, encontra os serviços adequados através da camada de serviço e evoca-os nos equipamentos físicos.

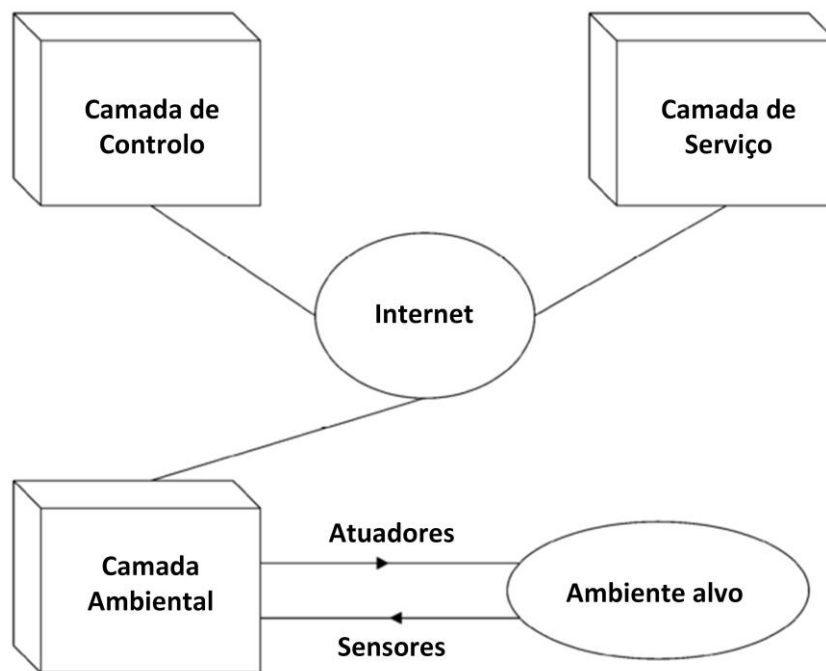


Figura 2.2 - Arquitetura CPS de três camadas, adaptado de (Hu *et al.*, 2012).

Em (Hu *et al.*, 2012) é proposta uma arquitetura geral, baseada na Indústria 4.0. Nesta arquitetura, representada na Figura 2.3, são consideradas cinco camadas:

- **Camada de percepção**, é a fonte de dados das camadas acima, ou seja, é a camada onde os sensores estão integrados. A função desta camada é receber dados provenientes dos sensores e enviá-los para a camada de processamento. WSN (*Wireless Sensor Network*) é uma das técnicas básicas.
- **Camada de informação**, consiste em dispositivos computacionais e de armazenamento, que fornecem dados heterogêneos processados, como dados normalizados e com redução de ruído, para armazenamento.
- **Camada de serviço**, fornece as funções típicas de todo o sistema, incluindo decisão, execução, análise e calendarização de tarefas. Nesta camada, certos serviços interagem entre si.
- **Camada de execução**, tal como a camada de percepção, interage com o mundo físico, através de atuadores (dispositivos físicos), como por exemplo, lâmpadas. Aqui são recebidos e executados os comandos do sistema.
- **Garantia de segurança**, presente em todo o sistema, desde a segurança no acesso, nos dados, até à segurança nos equipamentos. Garante a segurança do sistema, de acessos não autorizados ou ataques indesejados.

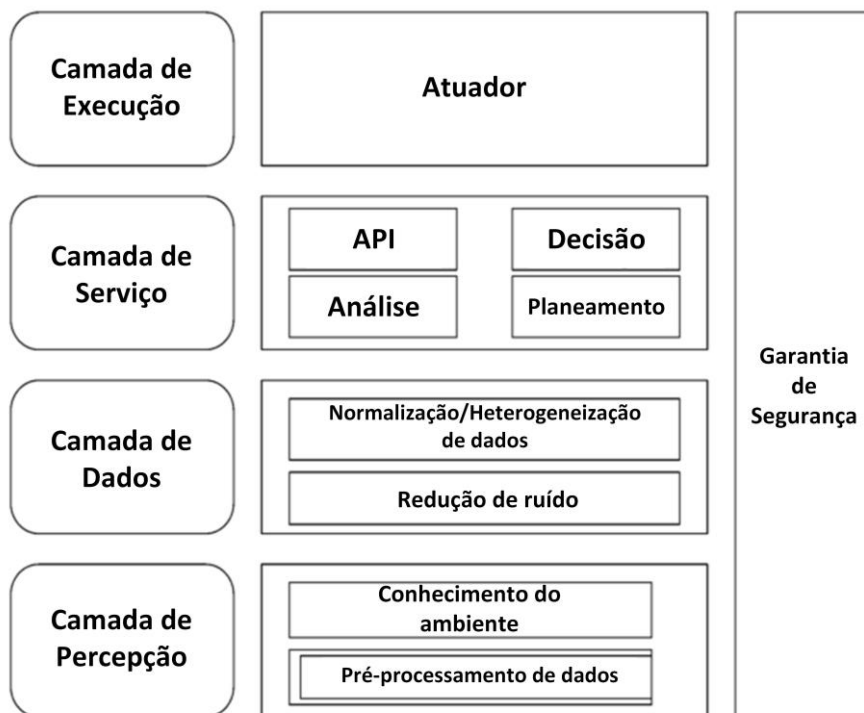


Figura 2.3 - Arquitetura CPS baseada em SOA, adaptado de (Hu *et al.*, 2012).

Esta arquitetura simplifica os detalhes das diferentes camadas, pois diferentes requisitos necessitam de abordagens distintas, conseguidas com a integração de diferentes serviços e/ou componentes. A principal vantagem desta arquitetura é a sua flexibilidade de integração de serviços ou componentes.

Uma diferente arquitetura de cinco camadas é também proposta em (Lee, Bagheri and Kao, 2015). É denominada de arquitetura 5C, dispõe de um guia para desenvolvimento e implantação de um sistema CPS para aplicações de manufatura. Esta abordagem define, através de uma sequência de trabalho, como se constrói um CPS desde a aquisição de dados, à análise do resultado final obtido. A Figura 2.4 ilustra, de uma forma detalhada, a arquitetura 5C. Os diferentes níveis podem ser descritos da seguinte forma:

- **Nível de conexão inteligente**, adquire dados provenientes das máquinas e dos seus componentes. Os dados podem ser medidos diretamente via sensores ou obtidos através de sistemas de controlo.
- **Nível de conversão dados-informação**, atualmente existem inúmeros métodos para inferir informação a partir de dados. É este nível desta arquitetura que mune as máquinas de autoconsciência, através de métodos que realizam ações, como prognósticos e gestão do tempo de vida da própria máquina.

- **Nível *cyber***, a informação recebida está interligada, formando uma rede. É extraída informação que fornece uma melhor introspectiva acerca do estado de cada máquina, podendo ser feita uma análise do desempenho individual e compará-la com as restantes máquinas, dotando o sistema de uma capacidade de auto comparação. As semelhanças entre os desempenhos atuais das máquinas, bem como os estados anteriores, podem levar a uma previsão de comportamentos futuros dos equipamentos.
- **Nível de cognição**, dota o sistema de um completo conhecimento acerca da sua monitorização. Com o conhecimento adquirido, os especialistas podem tomar decisões mais adequadas para cada uma das ações. Com a disponibilidade dos resultados das comparações e do estado individual das máquinas, as tarefas podem ser organizadas por prioridade, levando a uma otimização dos processos de manutenção.
- **Nível de configuração**, dá o *feedback* do ciberespaço para o espaço físico e atua como um supervisor de controlo, tornando as máquinas auto configuráveis e auto adaptáveis. Este nível aplica, no sistema monitorizado, as decisões de correção e prevenção que são tomadas no nível de cognição.



Figura 2.4 - Arquitetura 5C para implementação de CPS, adaptado de (Lee, Bagheri and Kao, 2015)

2.2 Sistemas fotovoltaicos inteligentes (*Smart PV*)

Com a introdução do conceito de IoT nos sistemas fotovoltaicos o seu desempenho, monitorização e manutenção, podem vir a ser aperfeiçoados. Devido ao desenvolvimento desta área, o custo dos equipamentos tem vindo a baixar levando à procura por instalações fotovoltaicas. Este aumento da procura de tecnologia fotovoltaica leva à necessidade de arquiteturas mais sofisticadas, para a automatização do sistema, como a monitorização remota de sistema instalados em locais inacessíveis e que não podem ser monitorizados no local.

Para o estudo dos *Smart PV* é importante perceber a base dos sistemas fotovoltaicos convencionais, desde a unidade base ao conjunto de elementos que forma um sistema fotovoltaico.

2.2.1 Sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico converte radiação solar em energia elétrica através das suas células. Devido à sua estrutura modular, é possível criar sistemas de algumas dezenas de watts até sistemas na ordem dos megawatts no caso de grandes estações fotovoltaicas. Estes sistemas podem-se classificar em três categorias: autónomos, ligados à rede e híbridos. Já que apenas é gerada energia elétrica quando os painéis estão iluminados, pode-se recorrer a sistemas de armazenamento de energia para disponibilizar essa energia mais tarde, normalmente com o auxílio de baterias. Na Figura 2.5 pode-se observar um diagrama com a classificação dos sistemas fotovoltaicos.

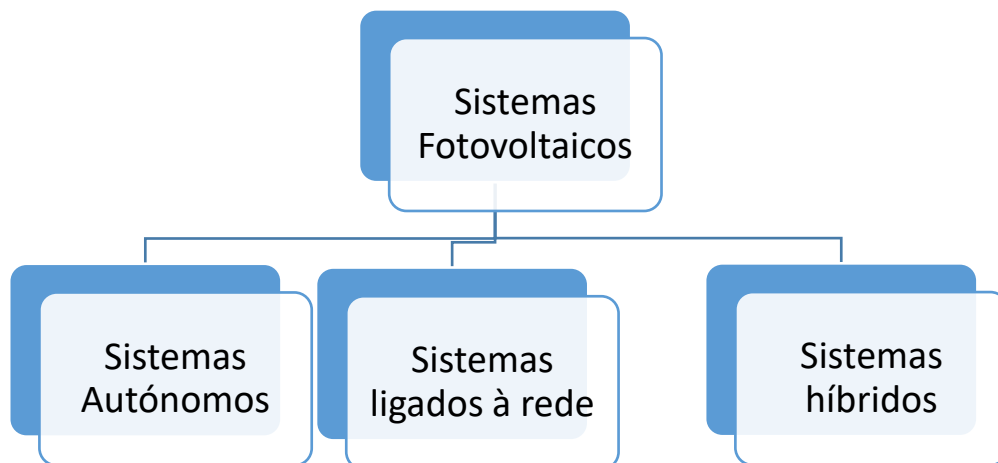


Figura 2.5- Classificação de sistemas fotovoltaicos.

Um sistema autónomo assegura energia elétrica, pelos seus próprios meios, sem recorrer à rede elétrica. Assim o seu dimensionamento é normalmente efetuado com base na radiação disponível no mês com menor radiação solar. Este tipo de sistemas deve também incluir baterias, controladores de carga para gerir a carga da bateria e inversores se existirem cargas a alimentar em corrente alternada (AC). Na Figura 2.6 é exemplificado um sistema autónomo.

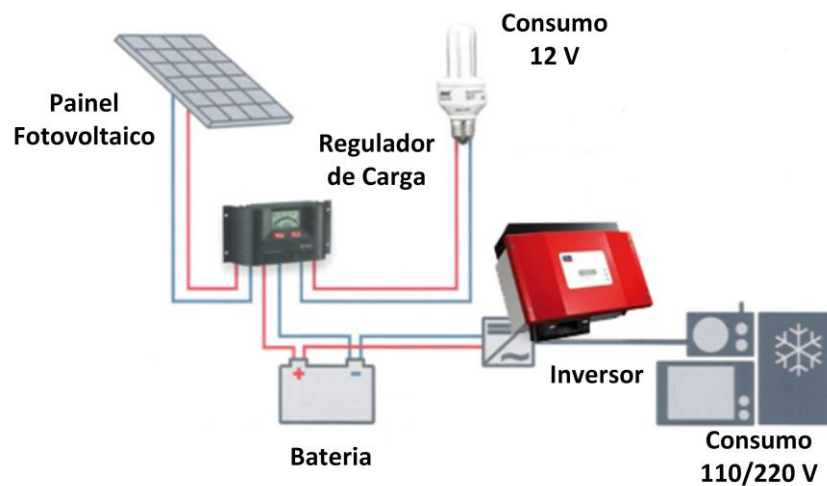


Figura 2.6 - Sistema autónomo.

O sistema de produção própria que injeta energia na unidade de consumo durante os períodos em que o equipamento instalado tem condições para produzir energia elétrica, enquanto a rede pública garante o abastecimento de forma regular. Os sistemas ligados à rede enviam a energia produzida para a rede. Esta energia é produzida em corrente contínua (DC), portanto é necessária a utilização de um inversor que faça a interface entre a instalação e a rede e que a converta em AC exigida pela rede, como se pode observar na Figura 2.7.

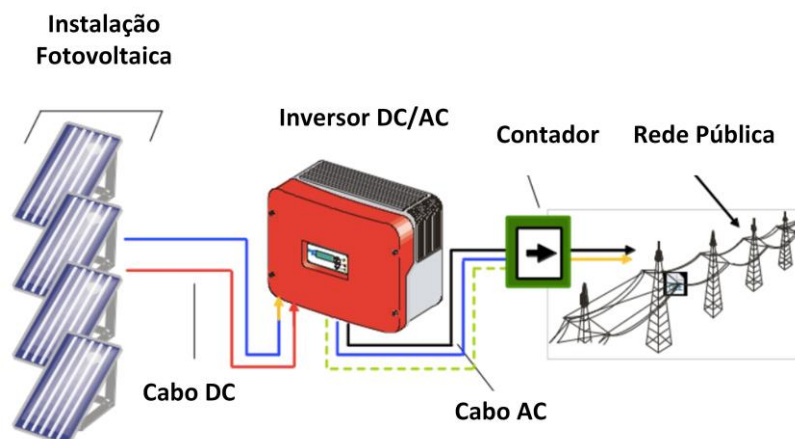


Figura 2.7 - Sistema ligado à rede.

Os sistemas híbridos, para além do sol, consideram outros recursos, como o vento, água, diesel, que em conjunto alimentam as cargas. São sistemas que podem garantir uma maior eficácia da instalação, uma vez que quando um dos recursos não está disponível pode-se recorrer a outros garantindo desta forma uma maior disponibilidade de energia elétrica. A Figura 2.8 representa um sistema híbrido com recurso à energia solar, eólica e ao diesel.

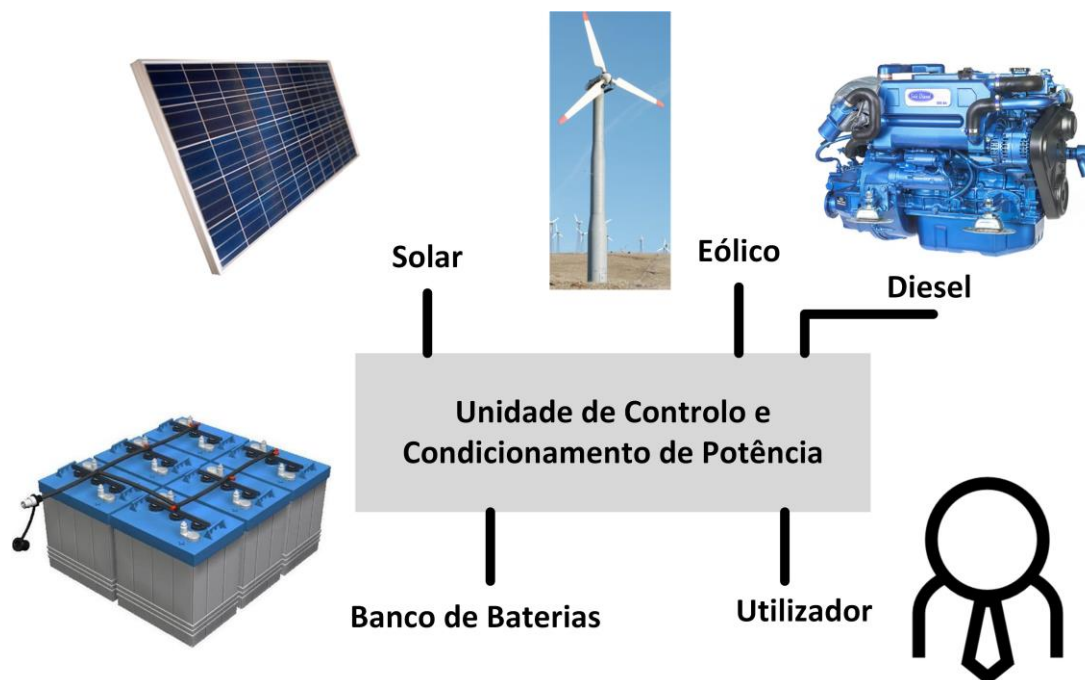


Figura 2.8 - Sistema híbrido.

Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica é um elemento que gera energia elétrica quando é iluminada por luz solar, ou até mesmo luz artificial, de acordo com o efeito fotoelétrico (Archer and Green, 2014). O efeito fotoelétrico¹, é um fenómeno fotoelétrico provocado pela absorção de fotões.

Para descrever as propriedades e a aplicação das células fotovoltaicas, interessa perceber a sequência dos fenómenos envolvidos, desde a radiação solar recebida, os processos de absorção desta radiação, a geração e o transporte da carga nos semicondutores, até à alimentação da carga. A célula fotovoltaica é constituída por um material semicondutor, como por exemplo silício, ao

¹ <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=521-01-20>

qual são adicionadas substâncias dopantes de forma a criar um meio propício para o estabelecimento do efeito fotovoltaico, pois uma célula formada por cristais de silício puro é incapaz de converter energia elétrica. Com um processo de dopagem do silício, onde se introduz elementos com diferentes propriedades elétricas, formam-se dois tipos de material semicondutor: tipo n, normalmente com a adição de fósforo, e tipo p, normalmente com adição de boro. Semicondutores de tipo n apresentam elétrons extra na banda de condução enquanto que os do tipo p têm um excesso de buracos (ausência de cargas negativas) na banda de valência. Quando se junta material de tipo n e tipo p, forma-se uma junção p-n, onde será produzida corrente elétrica em resposta aos diferentes comprimentos de onda de radiação eletromagnética (Green, 2003).

Um modelo que permite perceber o comportamento das cargas, baseia-se nas bandas de valência e condução. Entre estas bandas existe um hiato energético, E_g , equivalente à energia necessária para que um elétron consiga passar da banda de valência para a banda de condução. Na Figura 2.9 é possível observar-se a estrutura de um cristal de silício.

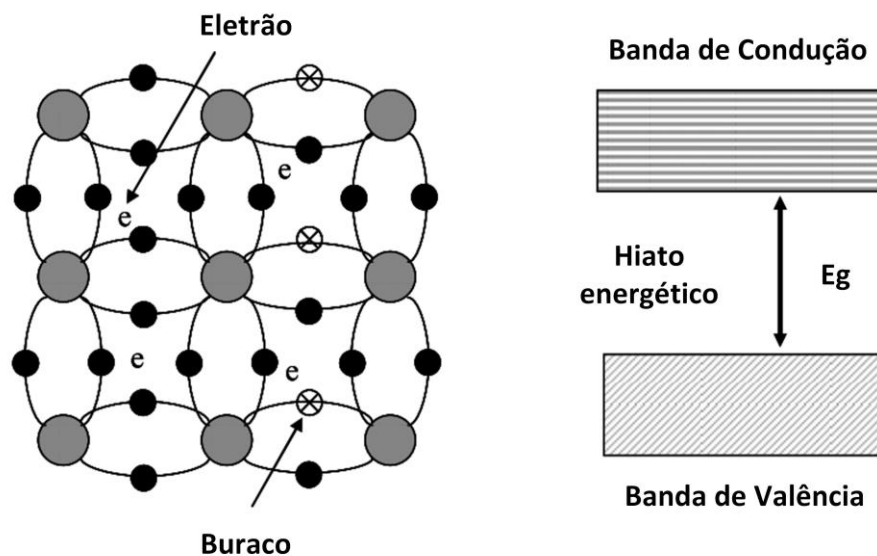


Figura 2.9 - Estrutura de um cristal de silício, adaptado de (Lobera, 2011).

A absorção dos fótons com energia superior ao hiato energético promove o movimento de elétrons da banda de valência para a banda de condução, criando pares elétron-buraco ao longo do material iluminado. Assim quando se ligam os terminais da célula a uma carga, passa a existir corrente elétrica. Se os seus terminais não estiverem ligados a qualquer carga, obtém-se a tensão em circuito aberto da célula. Na Figura 2.10 é apresentada a estrutura de uma célula fotovoltaica típica.

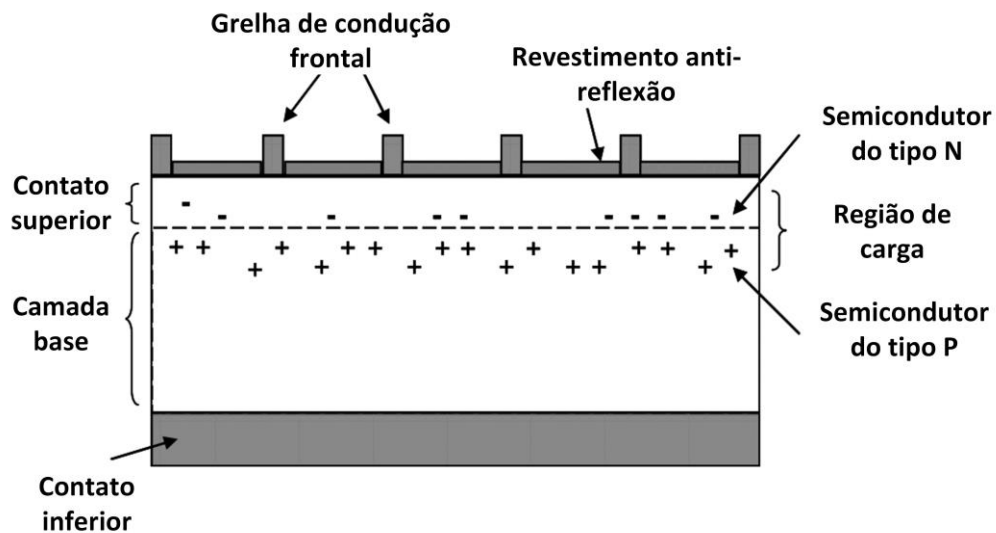


Figura 2.10 - Estrutura de uma célula fotovoltaica, adaptado de (Lobera, 2011).

Modelo equivalente detalhado da célula

Nas células existe uma queda de tensão no circuito até aos contatos exteriores, que normalmente é representada por uma resistência em série, R_S , e correntes de fuga que podem ser consideradas como uma resistência em paralelo, R_P . Um circuito elétrico equivalente é o que se representa na Figura 2.11.

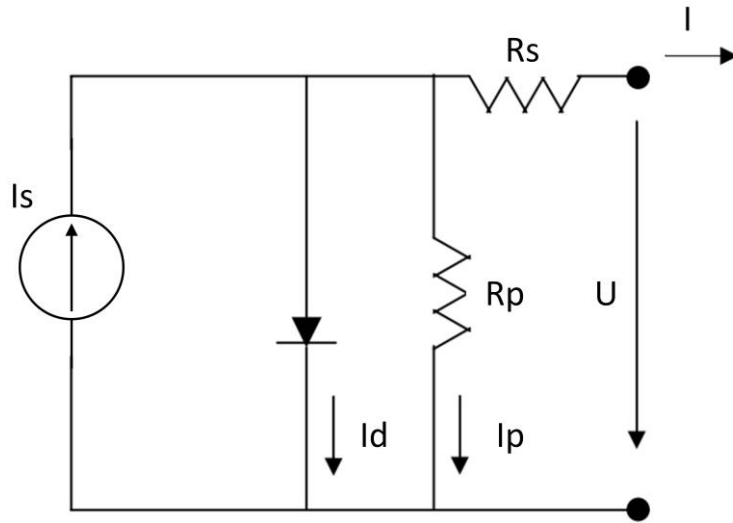


Figura 2.11 - Modelo equivalente detalhado da célula fotovoltaica, adaptado de (Castro, 2002).

A corrente I que se fecha pela carga é dada por,

$$I = I_S - I_D - I_P = I_S - I_0 \left(e^{\frac{U + R_S \cdot I}{m \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + R_S \cdot I}{R_P} \quad 2.1$$

em que:

- I_0 é a corrente inversa máxima de saturação do díodo
- U é a tensão aos terminais da célula
- m é o fator de idealidade do díodo (díodo ideal $m=1$; díodo real: $m>1$)
- U_T é o potencial térmico, $U_T = \frac{K \cdot T}{q}$
- K : constante de Boltzmann ($K = 1.38 \cdot 10^{-23} J/^{\circ}K$)
- T : temperatura absoluta da célula em $^{\circ}K$
- q : carga elétrica do eletrão ($q = 1.6 \cdot 10^{-19} C$)

Existem dois pontos de funcionamento da célula que devem ser referidos, o curto-circuito e o circuito aberto.

No caso do curto-circuito, a corrente de curto-circuito (I_{CC}) é o valor máximo da corrente de carga, igual à corrente gerada por efeito fotovoltaico. O seu valor em condições STC é fornecido pelo fabricante sendo medido sob determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

No caso do circuito aberto, a tensão em vazio (U_{CA}) é o valor máximo da tensão aos terminais da célula, que ocorre quando esta está em vazio. O seu valor em condições STC, tal como no caso anterior, é fornecido pelo fabricante sendo medido em determinadas condições de radiação incidente e temperatura (Castro, 2002).

$$I = I_S = I_{CC} \quad 2.2$$

$$U_{CA} = m \cdot U_T \cdot \ln\left(1 + \frac{I_S}{I_0}\right) \quad 2.3$$

Segundo (Mujumdar and Tutkane, 2013), em (Mukaro and Carelse, 1999) é referido que se se utilizar o circuito equivalente da célula e as equações matemáticas associadas, pode-se estabelecer a seguinte relação,

$$I_{CC} = K \cdot G \quad 2.4$$

onde I_{CC} é a corrente de curto-circuito, K ($A \cdot m^2/W$) é uma constante ajustada experimentalmente e G a irradiância. Com esta relação é possível obter o valor de irradiância no local.

Módulos fotovoltaicos

Uma célula individual, produz uma reduzida potência elétrica, normalmente entre 1 e 3 W, com uma tensão inferior a 1 V. A construção de módulos baseia-se no princípio de aumentar os valores de tensão aos terminais da instalação. Consoante o valor de tensão desejado, colocam-se células em série, Figura 2.12, onde a corrente aos terminais é a corrente, I , que atravessa cada uma das células e a tensão gerada, U , é a soma das tensões de cada uma delas, como representado na Figura 2.13,

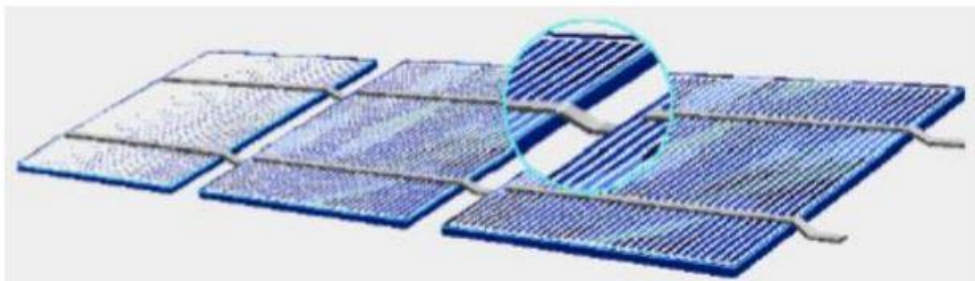


Figura 2.12 - Células ligadas em série.

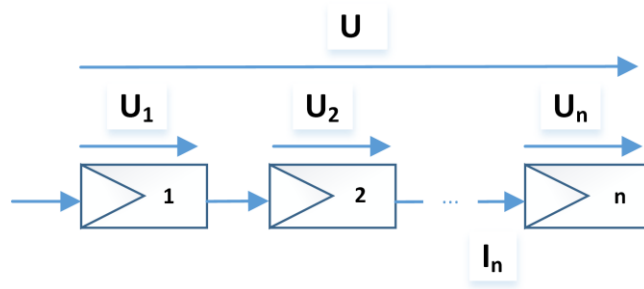


Figura 2.13 – Tensão e corrente em células ligadas em série.

obtém-se,

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad 2.5$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad 2.6$$

com n o número de células associadas em série.

A ligação das células em série tem implicações no desempenho do módulo, uma vez que quando uma célula é sombreada, o seu desempenho degrada-se, pois a corrente de curto-circuito da célula depende diretamente da irradiância. A célula sombreada pode passar a ser polarizada inversamente se uma outra célula estiver ligada em série e em correto funcionamento. Desta forma a célula está a ser vista como uma carga, e por consequência irá aquecer e poderá danificar-se.

Este fenómeno é resolvido com a introdução de um díodo de *bypass*, que irá proteger a célula, evitando que a corrente circule no sentido contrário. Por questões económicas, normalmente este díodo é colocado de forma a proteger várias células e não uma só, como se pode observar na Figura 2.14, reduzindo-se significativamente o número de componentes introduzidos no sistema.

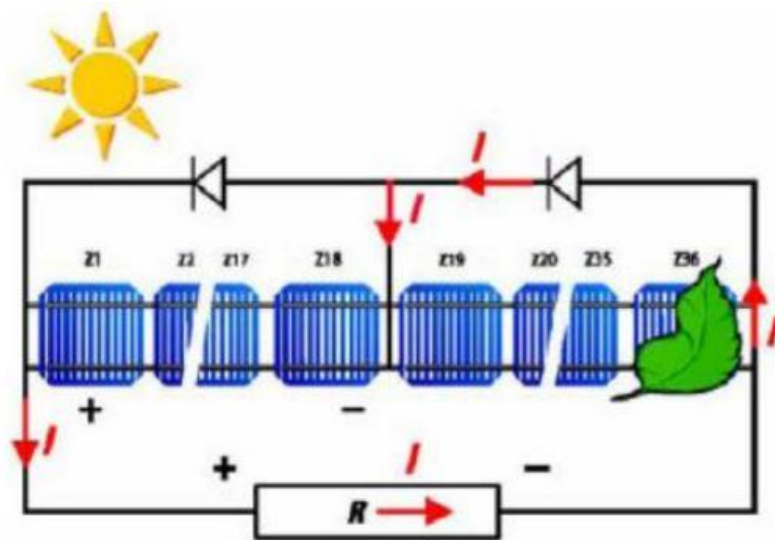


Figura 2.14 - Módulo fotovoltaico sombreado, com introdução de díodos de derivação, retirado de (Freitas, 2008)

Fileiras fotovoltaicas (*Strings*)

Tal como as células, os módulos fotovoltaicos podem ser ligados em série para a obtenção de tensões mais elevadas, formando fileiras, as quais podem ser colocadas em paralelo para atingir correntes de maior valor. Assim como o rendimento das células é influenciado pelo fator de sombreamento, nas fileiras este fenómeno também pode influenciar o comportamento global do sistema, já que poderá provocar aquecimento e consequente degradação do módulo.

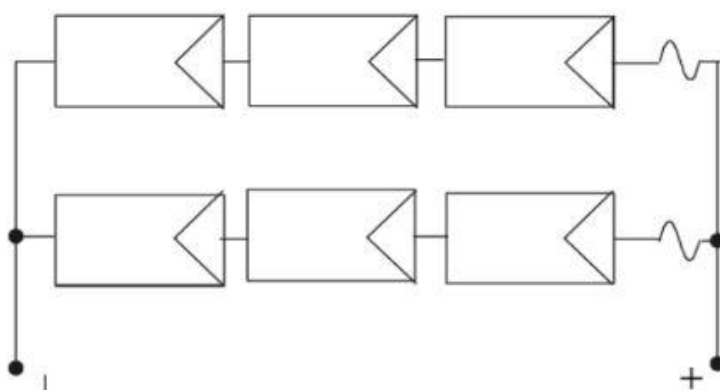


Figura 2.15 - Composição de duas fileiras fotovoltaicas, ligadas em paralelo.

A Figura 2.15 representa duas fileiras ligadas em paralelo. Pode-se observar a ligação em paralelo de duas associações de três módulos em série, tendo nos seus terminais a soma das correntes de cada uma das fileiras e a soma das tensões de cada um dos módulos de uma fileira.

Inversor

A corrente gerada através de uma instalação fotovoltaica é contínua, mas a rede elétrica e os equipamentos aí ligados operam tipicamente em corrente alternada. Os inversores são dispositivos que convertem corrente contínua em corrente alternada, podendo esta ser monofásica ou trifásica. Estes dispositivos são usados em vários tipos de sistemas, como sistemas diretamente ligados à rede elétrica e sistemas autônomos, tendo-se em cada um dos casos funções diferentes. Nos sistemas ligados à rede, como representado na Figura 2.16, os inversores devem-se sincronizar com a rede, em valor eficaz, frequência e fase. Nos sistemas autônomos deve gerar uma determinada tensão a uma determinada frequência, ou seja, no primeiro caso o inversor é dependente da rede, mas no segundo caso é independente. A escolha do inversor requer algum cuidado, dependendo do tipo de sistema a ser projetado, deve-se ter em conta diversos fatores, como o tipo de carga a alimentar e a própria eficiência do inversor. Na Figura 2.17 é apresentado um exemplo de um inversor fotovoltaico da ABB.

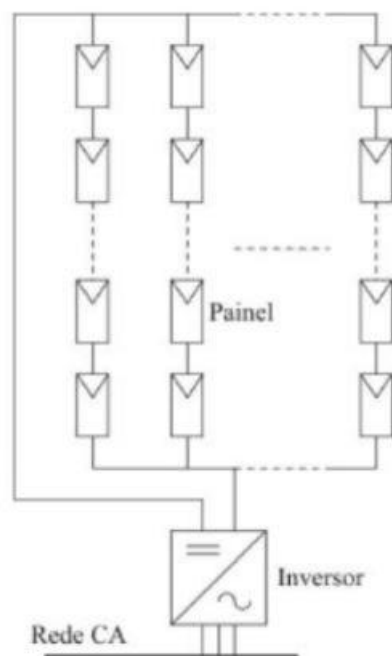


Figura 2.16 - Ligação da instalação à rede, por meio de um conversor DC/AC (inversor).



Figura 2.17 – Inversor fotovoltaico da ABB.

2.3 Monitorização de sistemas fotovoltaicos

Com a monitorização da atividade dos sistemas fotovoltaicos podem-se estudar diversos fatores que indicam o seu estado de funcionamento, como as diferenças de temperatura em diferentes pontos de um painel, a irradiância ao longo de um dia e a eficiência do sistema. A caracterização de um módulo fotovoltaico é normalmente obtida pela sua curva I-V, curva que relaciona a tensão e corrente à saída do módulo, nas condições STC (*Standard Test Conditions*), definidas por uma irradiância de 1000 W/m^2 , temperatura da célula de 25°C e massa de ar 1,5².

Estes estudos requerem componentes adequados, como sensores, sistemas de aquisição de dados, comunicação de dados e *software*. A monitorização revela-se extremamente importante pois permite determinar se o sistema apresenta os níveis de produção pré-estabelecidos na sua fase de projeção.

O mercado já apresenta sistemas para a monitorização de sistemas fotovoltaicos. Para já destaca-se um equipamento de registo de dados, denominado de *Cloud Connect Advanced*, da empresa Tigo®³, observado na Figura 2.18, que liga módulos inteligentes à *cloud* e ao seu próprio software

² A massa de ar representa uma medida relativa do caminho que os raios solares devem percorrer, pela atmosfera, até ao módulo em estudo.

³ <https://www.tigoenergy.com/de/products/#cloud-connect-advanced>

Tigo Smart Monitoring. Permite também uma desconexão entre módulos remotamente através do site ou da sua aplicação móvel e permite optar por diferentes ligações à Internet, nomeadamente, via Ethernet, Wi-Fi, ou ligação móvel. Entre outras, pode-se também destacar equipamentos como o Transclinic da Weidmüller⁴, que faz uma monitorização contínua da potência de uma ou mais fileiras, assim como da tensão do próprio sistema fotovoltaico permitindo uma monitorização detalhada do sistema. Na Figura 2.19 pode-se observar o modelo 8I+ da Transclinic.



Figura 2.18 - Cloud Connect Advanced.



Figura 2.19 - Transclinic, modelo 8I+.

⁴ <http://catalog.weidmueller.com/catalog/Start.do?localeId=en&ObjectID=group60681041117010>

Com o crescimento das tecnologias sem fios, também surgiram dispositivos como o PV-SCTL16 da Naturela Electronics⁵, Figura 2.20, que se distingue pelos módulos de medições sem fios. Permite também a medição da radiação solar via Piranómetro, a indicação das fileiras danificadas através dos indicadores LED (*Light Emitting Diode*), a possibilidade de anexar um módulo de rádio NR-868Pv3 e integra sensores de temperatura.



Figura 2.20 - Sistema de monitorização, PV-SCTL16.

2.3.1 Aquisição e monitorização de dados

Numa instalação podem existir diversos sensores, na sua maioria analógicos, que necessitam de estabelecer uma ligação com o mundo digital.

Um sistema de aquisição de dados, DAQ (*Data Acquisition System*), é usado para receber informação sobre um dado fenómeno físico (Emilio and Aurizio, 2013). O seu princípio base é a conversão do sinal elétrico recebido, valor analógico, para um sinal digital que possa ser processado por um dispositivo adequado. Os sistemas de controlo têm vindo a tornar-se cada vez mais complexos, levando à necessidade da integração de processamento em unidades de sensores.

O conceito de *Analog Front End* (AFE)⁶ baseia-se em produtos que integram amplificadores, filtros, conversores analógico-digital (ADC) e digital-analógico (DAC), tornando-os numa

⁵ <http://www.naturela-bg.com/en/product/23-0-pv-sctl16-pv-monitoring/>

⁶ <http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/communications-analog-front-ends.html>

solução para diversas aplicações, como comunicações em infraestruturas, banda larga sem fios, redes domésticas e *modems*. O desenvolvimento de circuitos de interface com sensores, integrados num único dispositivo, facilita o desenvolvimento de projetos devido ao acondicionamento de sinal e à sua versatilidade.

Como indicado em (Christin *et al.*, 2009), um dos principais fatores a ter em conta nesta fase de um projeto é o baixo consumo de energia, mas existem outros fatores que tomam especial importância aquando da seleção dos dispositivos a utilizar, como o seu custo, segurança na gestão de dados e facilidade de manipular. Tecnologias, como ZigBee e Bluetooth, asseguram soluções de comunicações sem fios de baixa potência, adequadas para o contexto de IoT. Consequentemente, surgem outras tecnologias como IEEE 802.11ah, LoRa e 6Lowpan (Sheng *et al.*, 2013). A Figura 2.21 apresenta uma possível arquitetura de um sistema de monitorização de módulos fotovoltaicos.

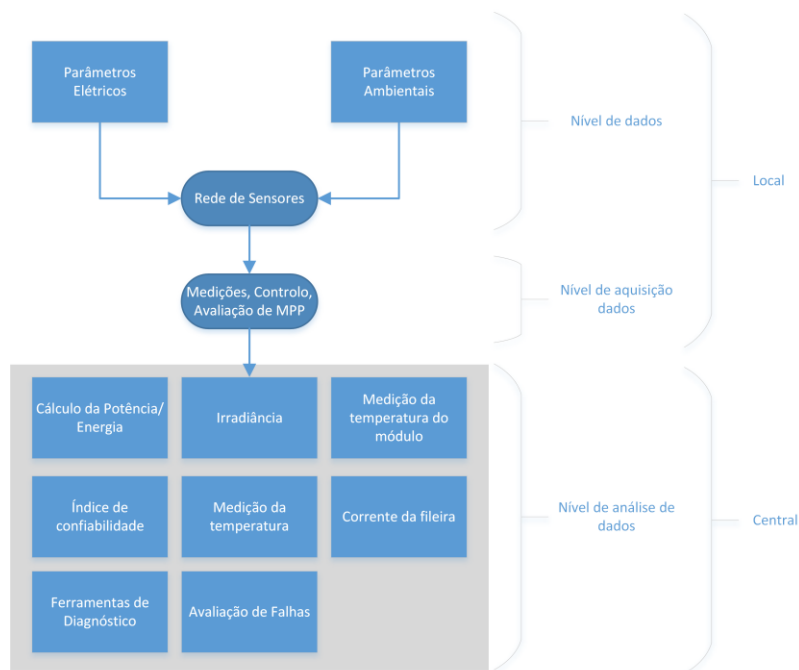


Figura 2.21 - Possível arquitetura de um sistema de monitorização de módulos fotovoltaicos, adaptado de (Cristaldi, Faifer and Lazzaroni, 2016)

2.4 Sensores

Os ambientes inteligentes estão presentes nas mais variadas áreas, desde a construção, serviços públicos, automação industrial, doméstica, naval aos sistemas de transporte. Estes

ambientes inteligentes dependem, em primeiro lugar, da disponibilidade de dados acerca do mundo real. Os dados são obtidos através de sensores específicos de cada fenómeno físico.

O avanço na eletrónica e comunicações sem fios permitiu o desenvolvimento de nós de sensores de reduzidas dimensões, reduzida potência, multifuncionais que comunicam a curtas distâncias. Estes nós incluem medições, processamento de dados, componentes de comunicação que levam à formação de redes de sensores. As redes de sensores têm várias aplicações desde a área da saúde, militar até ao sector residencial.

Uma rede de sensores é composta por um largo número de nós de sensores que são posicionados nos locais adequados para medir os parâmetros estudados. Uma possível arquitetura é apresentada na Figura 2.22. Os sensores são colocados no local das medições e têm a capacidade de recolher dados e encaminhá-los para um *sink*. O *sink* pode comunicar com o equipamento que gere as tarefas via Internet ou satélite. O projeto de uma rede de sensores é influenciado por diversos fatores, tolerância de falhas, custos de produção, ambiente de operação, a topologia da rede de sensores, a escalabilidade, o consumo de potência e as restrições de *hardware* (Akyildiz *et al.*, 2010).

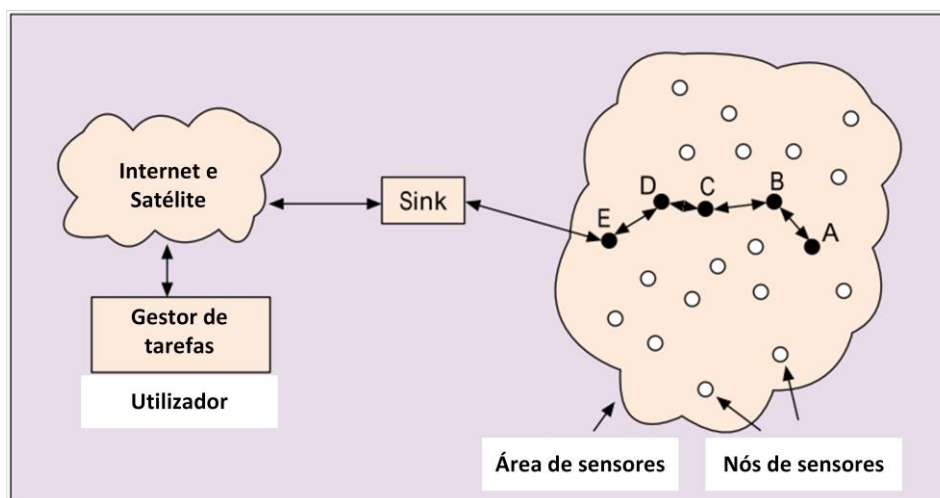


Figura 2.22 - Arquitetura de uma rede de sensores, adaptado de (Akyildiz *et al.*, 2010).

A posição dos sensores no sistema monitorizado deve ser estratégica, uma vez que um posicionamento desajustado pode levar a leituras que não correspondem às medidas reais. Dando um exemplo específico, segundo a norma disponível em (IEC, 2009), se o caso de estudo for um módulo fotovoltaico, a sua temperatura deve ser medida em quatro posições distintas, indicadas na Figura 2.23, assegurando que os sensores se encontram diretamente inseridos sobre uma célula e tendo em conta valores médios.

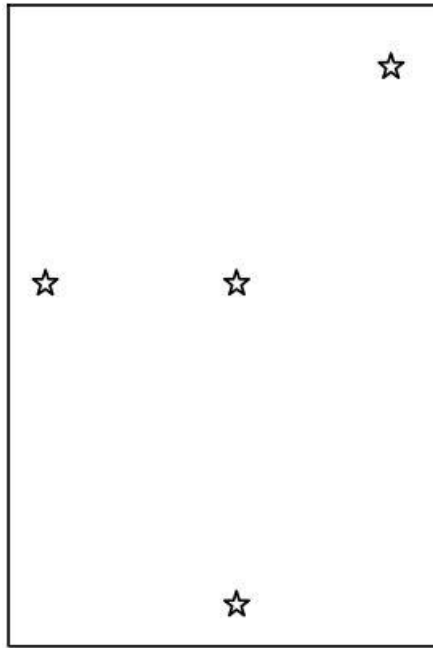


Figura 2.23 - Posição dos sensores na medição da temperatura de um módulo fotovoltaico, retirado de (IEC, 2009).

2.5 Controladores

Os controladores desempenham um papel fundamental no tratamento de sinais, como conversões de sinal analógico para digital, digital para analógico e amplificação de sinal. Neste sentido é importante referir algumas das tecnologias que mais são utilizadas nesta temática como,

- MSP430;
- ARM®;
- ATmega

com maior notoriedade nas plataformas MSP (*Mixed Signal Processor*) da Texas Instruments⁷, PSoC (*Programmable System-on-Chip*) da Cypress⁸ e Arduino⁹, respetivamente.

⁷http://www.ti.com/lscs/ti/microcontrollers_16-bit_32-bit/overview.page
⁸<http://www.cypress.com/products/microcontroller-mcu-and-programmable-system-chip-psoc-families>
⁹<https://www.arduino.cc/>

- Os microcontroladores da família MSP430 operam a frequências até 24MHz, memória não volátil até 128KB FRAM, RAM até 128KB FRAM e integram um CPU 16-bit MSP430. Quanto a periféricos, 10/12-bit ADC, comparador, temporizador, RTC, multiplicadores, comunicação I²C, SPI e UART. A temperatura de operação varia entre -40 e 85°C. A Figura 2.24 e Figura 2.25 apresentam a versão LaunchPad da plataforma MSP-EXP430G2 e o diagrama de blocos da versão MSP430FR2433, respectivamente.



Figura 2.24 - MSP430 LaunchPad.

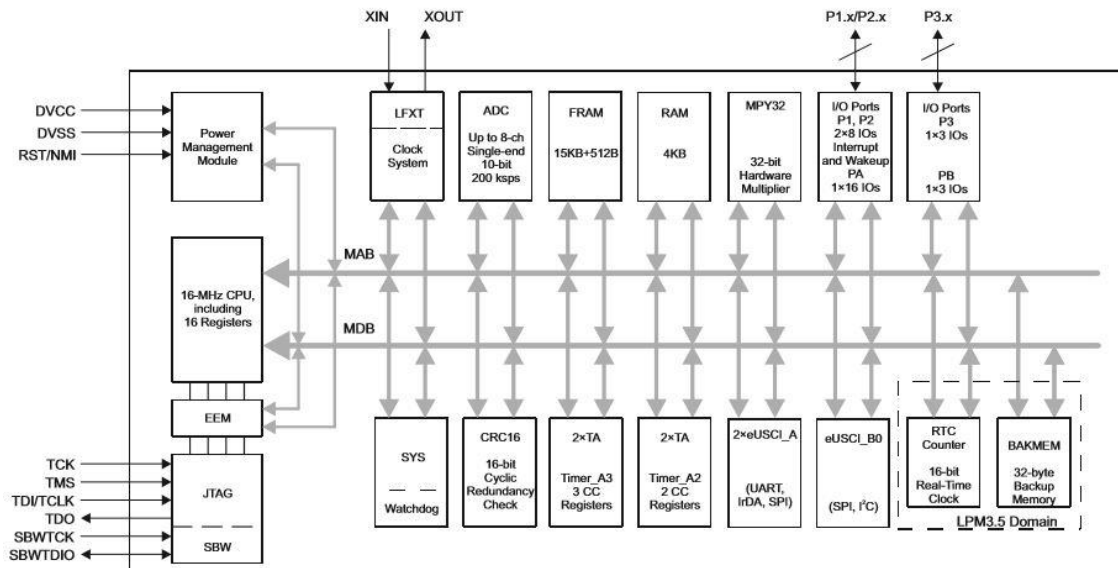


Figura 2.25 - Diagrama de blocos da versão MSP430FR2433, retirado de (Texas Instruments, 2017).

- A plataforma PSoC® 5LP possui um CPU ARM Cortex-M3 com 32 entradas de *interrupt*, controlador de 24 canais de acesso direto a memória (DMA) com transferência de dados entre os periféricos e memória, filtro digital *fixed-point*, blocos de construção universais e periféricos analógicos, como condensador *switch*, comparador, filtros digitais, sensores, AFE multiplexado com amplificadores operacionais programáveis, 12-bit SAR ADC, 8-bit DAC, *drivers* para ecrãs. O subsistema do CPU possui SRAM, EEPROM e memória *flash*, oscilador de baixa velocidade, conectividade com um oscilador de cristal externo para precisão e *clocking* programável e diversas fontes de *clock*, inclusive PLL. Este dispositivo também possui uma interface de comunicação I²C¹⁰, Full-Speed USB 2.0, CAN 2.0, capacidades de *debugging* através de JTAG e Serial Wire Debug. Na Figura 2.26 e Figura 2.27 pode observar-se a versão PSoC® 5LP e a respetiva arquitetura.



Figura 2.26 - CY8CKIT-059 PSoC® 5LP.

¹⁰Desenvolvido pela Philips, o protocolo I²C (Inter-Integrated Circuit) foi desenvolvido para uma comunicação série com um barramento de dois fios, um para os dados (Serial Data) e outro para o sinal de relógio (Serial Clock).

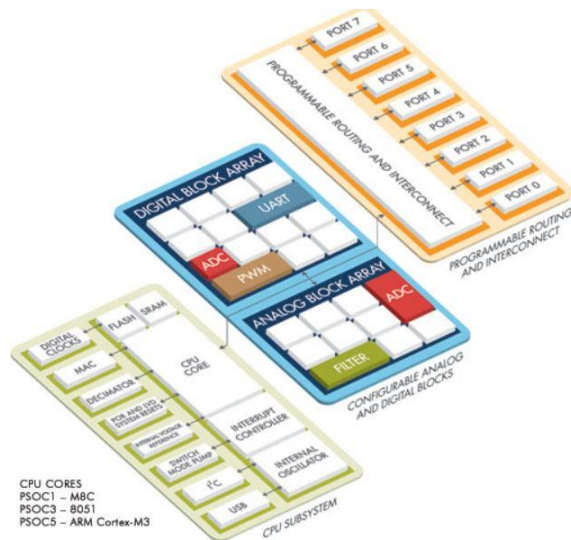


Figura 2.27 - Arquitetura PSoC, retirado de (Cypress, 2017).

- O microcontrolador utilizado pela versão UNO da plataforma Arduino é da família ATmega, nomeadamente ATmega328, com uma arquitetura avançada RISC, em termos de memória possui 32 KBytes de memória *flash* programável, 1KBytes EEPROM e 2KBytes de SRAM interna. As características principais dos periféricos são 2 contadores/temporizadores de 8-bit e 1 de 16-bit, contador de tempo real com oscilador separado, 6 canais PWM, 8 canais de 10-bit ADC em TQFP e 6 canais de 10-bit ADC em PDIP, USART programável, interface Master/Slave SPI, interface série 2-wire compatível com I²C, comparador analógico, tensão de operação de 1.8 a 5.5V e consumo (1MHz, 1.8V e 25°C) de 0.2 mA. Na Figura 2.28 e Figura 2.29 é possível observar a versão UNO e o diagrama de blocos da família de microcontrolador ATmega, respetivamente.



Figura 2.28 - Arduino UNO.

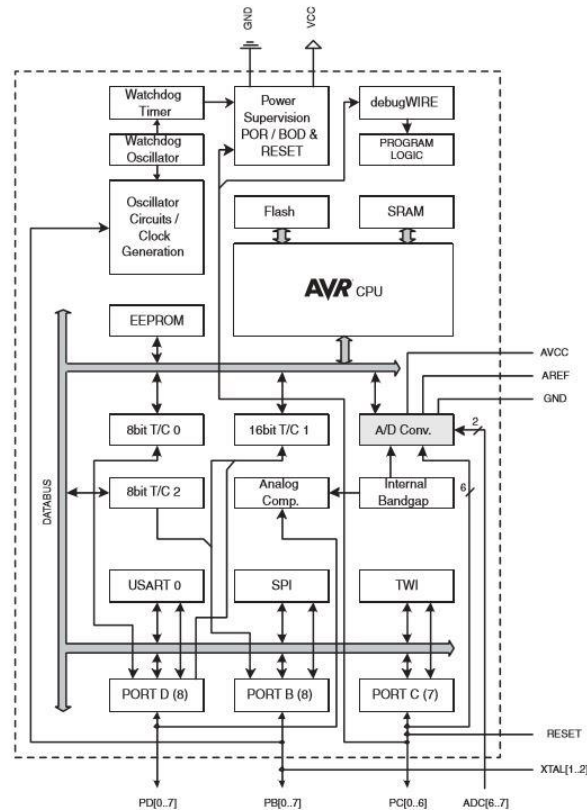


Figura 2.29 - Diagrama de blocos do ATmega, retirado de (Atmel, 2015).

2.6 Trabalhos desenvolvidos no âmbito de monitorização de sistemas

Nesta secção descrevem-se alguns dos trabalhos que têm sido desenvolvidos e que estão relacionados com a presente dissertação, na medida em que apresentam a mesma abordagem de leitura de parâmetros, tratamento de dados e envio/receção dos mesmos com o objetivo de monitorização de um sistema.

Existem diversos trabalhos desenvolvidos para a monitorização de sistemas fotovoltaicos, onde se estuda o desempenho do sistema pela leitura da tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito, dos valores de tensão e corrente aos terminais para aferir se o sistema está a funcionar de acordo com o previsto na fase de dimensionamento, assim como outros parâmetros, nível de irradiância e temperatura da célula, que mostram as condições de funcionamento dos módulos.

- O projeto apresentado em (Mujumdar and Tutkane, 2013) foi desenvolvido para monitorizar um sistema autónomo de 1 kW pico de potência. Consiste numa unidade de medições para tensão, corrente do sistema, nível de carga da bateria, valor da carga ligada ao sistema, e uma unidade de medições de parâmetros meteorológicos como, irradiância, temperatura do painel e velocidade do vento. Integra também *software* de registo de dados, para envio/receção de informação e posterior análise. A unidade de medições apresenta *hardware* de medições de parâmetros elétricos, uma memória *flash* de 128 Mb para armazenamento de dados e um visor LCD usado para interface com o dispositivo. Esta unidade comunica com as unidades de medições meteorológicas através de um barramento RS485 e está ligada a um computador através de um barramento RS232. Está preparada para suportar condições atmosféricas adversas, já que é colocada no telhado junto aos painéis fotovoltaicos. De seguida é descrito, de forma sucinta, o processo envolvido.

A tensão DC a ser medida é reduzida através de um atenuador de alta precisão e colocada no conversor ADC do microcontrolador, onde é de notar a importância da inserção de um filtro passa-baixo para minimizar o erro provocado pelo ruído de baixas frequências e *ripple*. Para a corrente recorre-se a um sensor ACS712ELCTR-30AT de efeito de Hall que não necessita de nenhum circuito externo pois é isolado eletricamente entre a sua entrada e saída. Quanto aos parâmetros AC do inversor, é utilizado um medidor L&T make NOVA2000 que disponibiliza valores de tensão, corrente e potência. Os parâmetros são guardados numa memória *flash*.

A leitura da irradiância requer um processo mais complexo. São utilizados um piranómetro e um pireliómetro para uma medição precisa da irradiância. Estes sensores são utilizados para medir a radiação solar total, quer seja direta, difusa ou refletida e a intensidade da radiação solar direta, respetivamente. De acordo com a norma IEC62714 é recomendado o uso de uma célula ou módulo de referência calibrados com um piranómetro. A corrente de curto-circuito da célula de silício de referência ou do módulo altera-se linearmente com a variação do nível de insolação. Esta corrente é convertida para uma tensão proporcional através de uma resistência *shunt*, tensão essa que é enviada para o ADC do microcontrolador que fornece o respetivo nível de irradiância. Os valores de temperatura do módulo e temperatura ambiente são disponibilizados por dois sensores de temperatura baseados no LM35 da National Instruments, um colocado na parte de trás do módulo e outro na unidade de medições. Também é utilizado um anemómetro para se conhecer a velocidade do vento. Na Figura 2.30 pode-se observar o diagrama de blocos do sistema descrito.

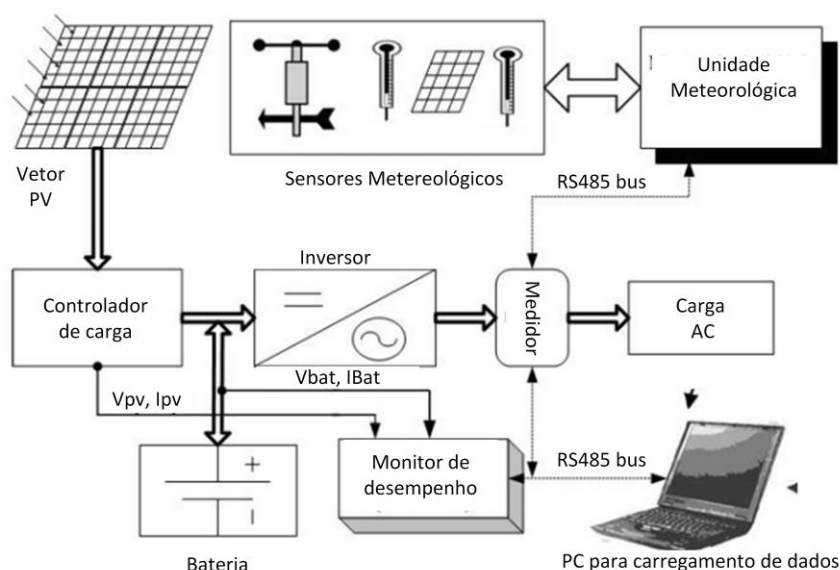


Figura 2.30 - Diagrama de blocos do sistema de monitorização de uma instalação fotovoltaica com baterias, adaptado de (Mujumdar and Tutkane, 2013)

- Um outro projeto é apresentado em (Papageorgas *et al.*, 2013), consistindo num sistema que fornece informação acerca do desempenho de cada módulo de uma instalação e que permite a otimização da produção de energia elétrica através de uma aplicação *web*. Os parâmetros são medidos e posteriormente enviados para um coordenador remoto. A plataforma, denominada de ZL01-node, é baseada num microcontrolador reconfigurável, sistema em placa (SOC, *System on Chip*), englobando um *modem RF (Radio Frequency)* de uma rede de sensores sem fios. A temperatura e humidade são medidas a partir de um sensor SHT11 da Sensirion Co e o nível de irradiância através de um fotodíodo. Neste procedimento existe um relé que garante o isolamento do painel antes da sua caracterização, onde através de uma técnica de regulação de tensão mede-se a corrente de curto-circuito do painel. Como no caso anterior, a tensão aos terminais do painel é medida após ser submetida a um circuito atenuador e a corrente à saída do painel passa por uma resistência, onde a queda de tensão é lida obtendo-se o valor digital correspondente.

O projeto foi desenvolvido tendo como base um microcontrolador PSoC e integra uma tecnologia de comunicação ZigBee RF, que oferece uma comunicação até um máximo de 3dBm de potência de saída adequada para distâncias entre 50 a 60 metros entre a plataforma e unidade de comunicação sem fios. Na Figura 2.31 pode-se observar a arquitetura proposta neste artigo.

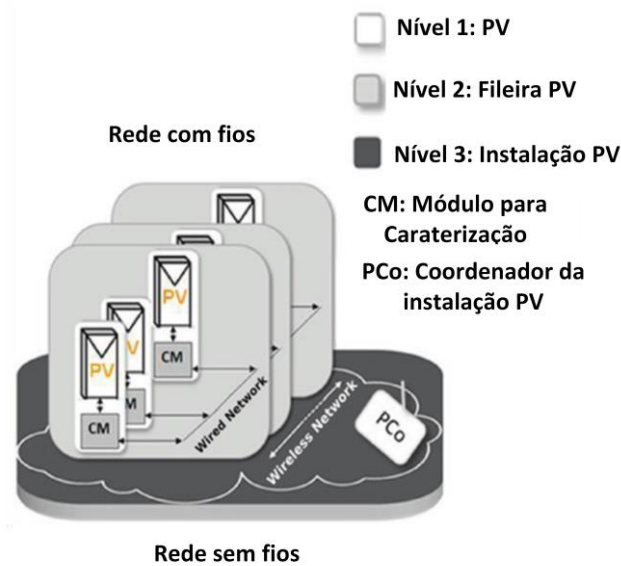


Figura 2.31 – Arquitetura proposta neste projeto, adaptado de (Papageorgas *et al.*, 2013).

- Um projeto mais antigo é descrito em (Kuzlu *et al.*, 2011), onde se introduz um sistema de aquisição de dados em tempo real, transmissão e comunicação, sem fios, entre o módulo de medições e um computador, através de módulos ZigBee. O sistema está dividido em duas partes; aquisição e monitorização de dados. O módulo de medição consiste num MSP430 e num módulo ZigBee, onde o primeiro é usado na recolha de dados gerados por sensores e o segundo no envio e receção dos mesmos para o módulo de monitorização, através de uma antena. No módulo de monitorização a informação é recebida e enviada por comunicação série, RS232, para um computador.

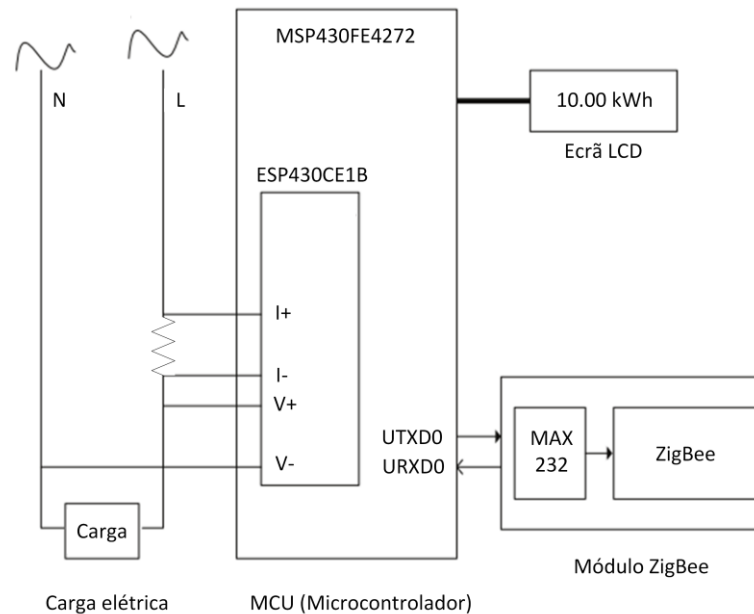


Figura 2.32 – Diagrama de blocos do medidor inteligente, adaptado de (Kuzlu *et al.*, 2011).

Na arquitetura do módulo de medições, foi escolhido o modelo MSP430FE4272 já que apresenta versões desenvolvidas para medições em aplicações relacionadas com energia. Para o módulo *ZigBee*, o modelo utilizado foi Xbee-1mW. Na Figura 2.32 pode-se observar o diagrama de blocos abordado neste trabalho.

2.7 Considerações finais

Em suma, devido à crescente necessidade de sistemas independentes com capacidades cognitivas foram surgindo opções que permitem dotar sistemas com as aptidões necessárias para conhecer, prever e alterar o seu comportamento. Estes sistemas englobam uma componente de cognição que analisa e toma decisões e uma componente física que executa os comandos.

Nos sistemas fotovoltaicos inteligentes, a obtenção dos valores de tensão, corrente, irradiância e temperatura é um processo fundamental na monitorização do sistema. Estes valores são trabalhados e analisados pela componente de cognição e consoante os resultados podem ser enviados comandos para os atuadores, com o intuito de inferir o comportamento presente e futuro e prever necessidades de manutenção. Neste pressuposto pretende-se desenvolver um equipamento que, numa primeira fase, consiga obter e analisar os parâmetros acima indicados em conjunto com um serviço *web* e, numa segunda fase, generalizar a função deste equipamento para as mais diversas áreas.

3 *Smart PV*: Arquitetura

O presente capítulo apresenta a arquitetura utilizada nesta dissertação. Inicialmente é identificado o modelo idealizado para solucionar os problemas indicados e posteriormente estabelecida uma ligação com os sistemas fotovoltaicos inteligentes.

3.1 Modelo conceptual

Neste subcapítulo é detalhado o modelo desenvolvido neste projeto. Este modelo consiste numa representação da interface entre o mundo físico e o mundo computacional que permite adquirir, tratar e gerir dados, registar numa plataforma e disponibilizar serviços. A arquitetura escolhida tem em conta o nível de complexidade, os objetivos do sistema e assenta nos conceitos dos sistemas ciberfísicos, sempre numa ótica de sistemas inteligentes, auto conscientes e auto adaptáveis. Este modelo foi idealizado tendo como base uma arquitetura de três camadas: camada física, camada de informação e camada de serviço como se pode observar na Figura 3.1.

A **camada física** é a fonte de dados das camadas superiores, ou seja, consiste nos sensores que estão colocados no local em estudo. Os elementos principais desta camada disponibilizam informação acerca dos parâmetros físicos em foco, e são localizados em lugares estratégicos para obtenção de medições fidedignas.

A **camada de informação** é constituída pelos equipamentos que dispõem dos serviços que podem ser invocados no sistema. Consiste em dispositivos computacionais e de armazenamento cuja principal função é fornecer dados heterogêneos processados. Integra os microcontroladores que interagem com o mundo físico e são responsáveis pela leitura, processamento e envio de

dados. Esta camada faz uma ligação entre o mundo físico e a camada superior e engloba capacidades de comunicação que permitem efetuar uma ligação a outros dispositivos e sistemas IoT.

A **camada de serviço** é a camada mais superficial do trabalho, na medida em que consegue ter uma maior abstração face aos equipamentos no terreno e pode fornecer, através dos dados por ela recebidos, funções típicas do sistema, como decisão, análise e previsão de resultados. As capacidades analíticas permitem uma transformação de informação em conhecimento e de certa forma inferir acerca da capacidade atual e futura do sistema e também prever necessidades de manutenção.

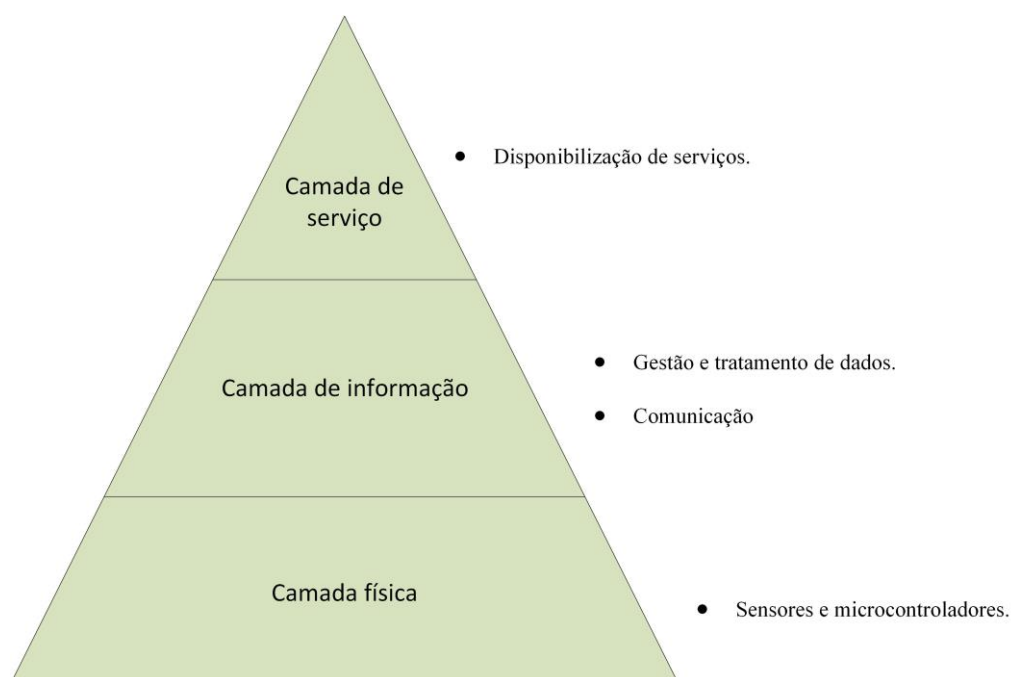


Figura 3.1 - Modelo arquitetural.

Com esta arquitetura o sistema pode ser potencializado para os mais diversos fins, apenas dependendo do nível de complexidade das suas camadas. A complexidade de cada camada limita as suas aplicações, ou seja, a camada física limita as instalações a estudar, a camada de informação o processamento e tratamento de dados e a camada de serviço os serviços que podem ser evocados no equipamento. Com a projeção adequada de cada uma das camadas e tendo em conta as suas funcionalidades e fácil utilização, permite a utilização para os mais diversos fins, desde instalações fotovoltaicas, parques de estacionamento a equipamentos domésticos. Apesar de ser adequado para diversos sistemas, o principal foco pode estar nos sistemas massificados, pelo fato

de existirem inúmeros equipamentos a monitorizar cuja monitorização pode ser facilitada pela introdução de um ou mais equipamentos genéricos responsáveis por esse processo.

Este conceito pode ser enquadrado no tema *Data as a Service* (DaaS), com a monitorização de sistemas e a disponibilização/venda de dados a entidades externas, Figura 3.2. O recurso a dados como serviço começa com a confiabilidade dos dados disponibilizados ao cliente e introduz uma facilidade, flexibilidade e uma disponibilização rápida de dados em qualquer localização, reduzindo tempo e esforço por parte do cliente. A arquitetura apresentada engloba uma camada de informação que pode integrar vários tipos de dados, como temperatura, modos de funcionamento, desempenho de sistemas que podem ser valores de interesse para empresas de estatística e tratamento de dados, encontrando assim novas oportunidades de mercado para o modelo aqui desenvolvido.

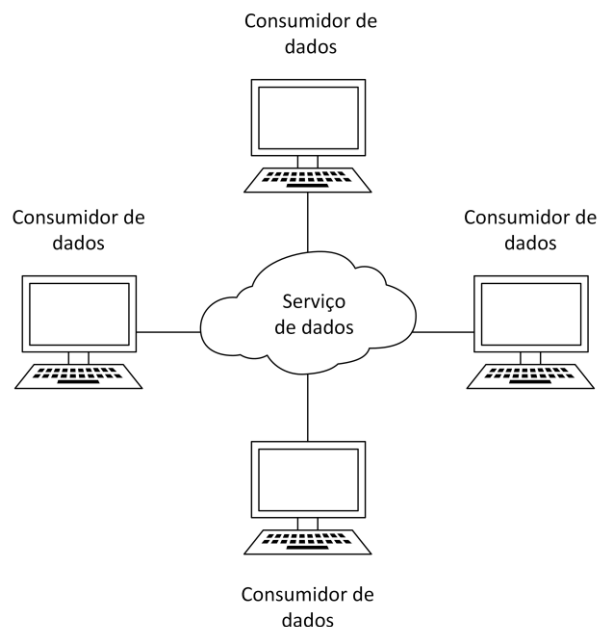


Figura 3.2 - Representação de um DaaS.

A Figura 3.3 permite esquematizar o funcionamento do sistema proposto nesta dissertação. Inicialmente são recolhidos dados dos sensores e efetuado um processamento de dados pelos microcontroladores que integram a camada física, no caso se tratarem de dados fidedignos prossegue-se com o encaminhamento de dados para um outro módulo do sistema, caso contrário volta-se a recolher novos dados. Assim que os dados são recebidos, podem ser enviados para uma base de dados online. Com a disponibilização dos dados online, estes podem então ser adquiridos por entidades externas, enquadrando assim este projeto nos temas de sistemas ciberfísicos e *Data as a Service*.

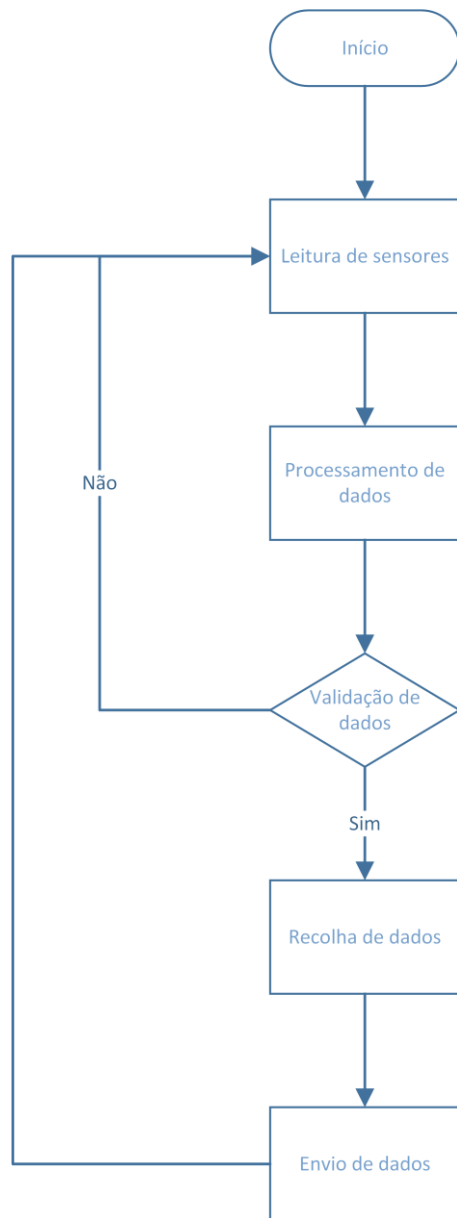


Figura 3.3 - Fluxograma do conceito apresentado.

3.2 Aplicação em *Smart PV*

O presente subcapítulo destina-se a estabelecer uma ligação entre o conceito apresentado no subcapítulo anterior e os sistemas fotovoltaicos, nomeadamente os sistemas inteligentes.

A eficiência de um módulo fotovoltaico pode ser seriamente afetada por sombreamentos, sujidade acumulada e pela degradação dos seus componentes. Muitas vezes esta degradação do desempenho do módulo não pode ser detetada visualmente, mas estes efeitos refletem-se no seu funcionamento, podem ser detetados pelo estudo do desempenho do sistema e dos seus parâmetros característicos e providenciar informação importante para a sua otimização.

Após a conceção do modelo, o foco desta dissertação passa pela sua aplicação nos sistemas fotovoltaicos. A metodologia proposta é adequada para topologias de sistemas PV mais limitadas, onde cada um dos módulos pode ser monitorizado autonomamente ou para integração em sistemas mais complexos onde se poderá estudar o comportamento de módulos específicos que permitem criar uma perceção acerca do desempenho global do sistema. Uma representação deste conceito é apresentada na Figura 3.4.

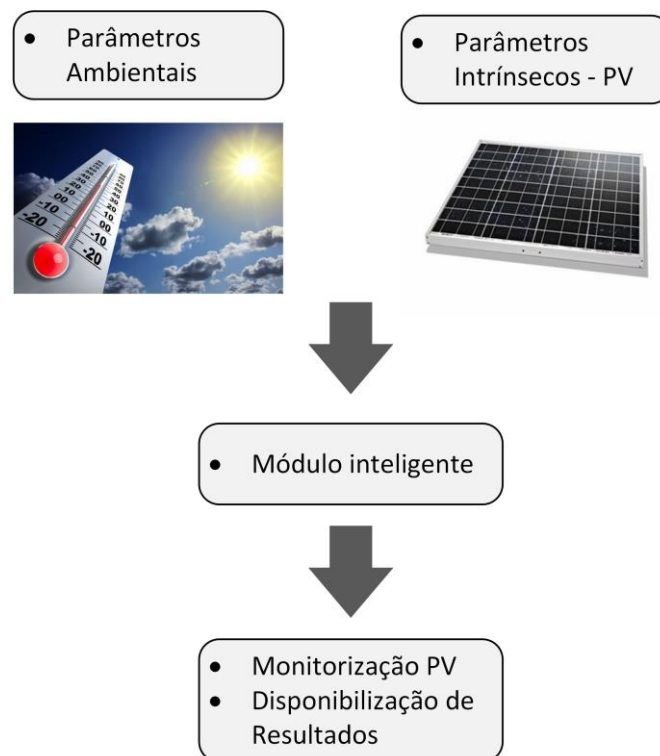


Figura 3.4 - Representação do conceito proposto.

Os parâmetros elétricos, térmicos ou mecânicos dos módulos fotovoltaicos são medidos nas condições de referência, STC, e disponibilizadas pelos seus fabricantes. No entanto, em contexto de utilização real, não se atingem estas condições, na realidade mesmo que o módulo fotovoltaico opere num cenário onde a temperatura ambiente seja 25°C, a temperatura do módulo será superior. Por este motivo, é especificada a temperatura nominal de funcionamento (do Inglês, *Nominal Operating Cell Temperature*, NOCT) do módulo fotovoltaico. Esta temperatura é definida como sendo a temperatura atingida pelas células de um módulo quando sujeitas às seguintes condições:

- Intensidade da radiação solar incidente na superfície = 800 W/m²;
- Temperatura ambiente = 20 °C;
- Velocidade do vento = 1 m/s.

A temperatura das células pode ser calculada através da seguinte equação,

$$T_{cél} = T_A + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot G \quad 3.1$$

onde $T_{cél}$ (em °C) é a temperatura da célula, T_A (em °C) é a temperatura ambiente e G (em W/m²) corresponde à irradiância no local. Na eventualidade de a velocidade do vento ser superior a 1 m/s, ocorrem maiores perdas por convecção e a temperatura do módulo será inferior ao valor calculado pela equação 3.1.

O rendimento de uma célula fotovoltaica depende não só da intensidade de luz incidente, mas também da própria temperatura. Esta temperatura é um parâmetro importante já que as células estão expostas aos raios solares e o seu aquecimento é considerável. Este parâmetro pode revelar muito acerca do desempenho do módulo, já que uma parte da luz incidente absorvida não é convertida em energia elétrica, mas sim dissipada sob a forma de calor, e como tal a temperatura da célula é normalmente superior à temperatura ambiente. Pretende-se inferir acerca dessa influência face aos valores de tensão e corrente aos terminais do módulo, cujos valores estão diretamente relacionados com o rendimento do painel e desta forma perceber como todos estes parâmetros se relacionam entre si.

A caracterização de um módulo fotovoltaico consiste na extrapolação da curva I-V para determinadas condições de irradiância e temperatura, que embora não represente o comportamento dinâmico do módulo, permite uma comparação qualitativa entre módulos. Estes parâmetros fornecem dados para uma caracterização fidedigna, apesar de existirem outros fatores que podem influenciar o seu desempenho.

Identificando-se os parâmetros que podem ser relevantes neste estudo, como é o caso da irradiância, temperatura ambiente, temperatura das células, tensão e corrente do módulo, pode-se fazer um estudo acerca do desempenho do módulo, calculando os valores teóricos da temperatura da célula, através de irradiância e temperatura ambiente, perceber se a temperatura de cada ponto de estudo do painel corresponde à temperatura teórica, analisar a influência da temperatura das células e a respetiva relação com os sombreamentos.

É importante referir que o foco desta dissertação passa pelas duas camadas inferiores, camada física e camada de informação, sendo a terceira camada desenvolvida em paralelo com outra dissertação.

4 Implementação do sistema

O presente capítulo destina-se à descrição do processo desenvolvido nesta dissertação, desde os sensores utilizados para cada uma das medições, os microcontroladores, a comunicação e o desenvolvimento das placas de teste. É também apresentada a estrutura dos dispositivos desenvolvidos, bem como os modos de funcionamento no qual o sistema opera.

4.1 Descrição da Infraestrutura para *Smart PV*

Neste subcapítulo faz-se a descrição global da infraestrutura desenvolvida. Conhecendo as limitações do mercado atual, implementou-se um dispositivo capaz de adquirir parâmetros essenciais na sua caracterização de um módulo fotovoltaico e enviá-los para uma base de dados online.

Neste projeto são utilizados quatro sensores de temperatura DS18B20 da Maxim Integrated, nas posições identificadas no Capítulo 2, para o estudo da influência da temperatura no desempenho do painel, um sensor de corrente ACS712 da Allegro, um sensor de irradiância TSL235 e um divisor de tensão para obtenção da tensão à saída do painel. Pelo fato de os sensores de temperatura serem digitais e permitirem uma comunicação *One Wire* (apenas um fio), foi necessário recorrer ao microcontrolador ATtiny85 da Atmel para efetuar uma interface entre os sensores e o microcontrolador PSoC, via comunicação I²C. Posteriormente a informação obtida pela PSoC é enviada para o módulo ESP32 da Espressif que comunica com a base de dados utilizada nesta dissertação, ThingSpeak, para registo e análise de dados. Na Figura 4.1 está representado o fluxograma pelo qual se rege o sistema desenvolvido. Face ao modelo conceptual, não foi desenvolvido um algoritmo de validação de dados.

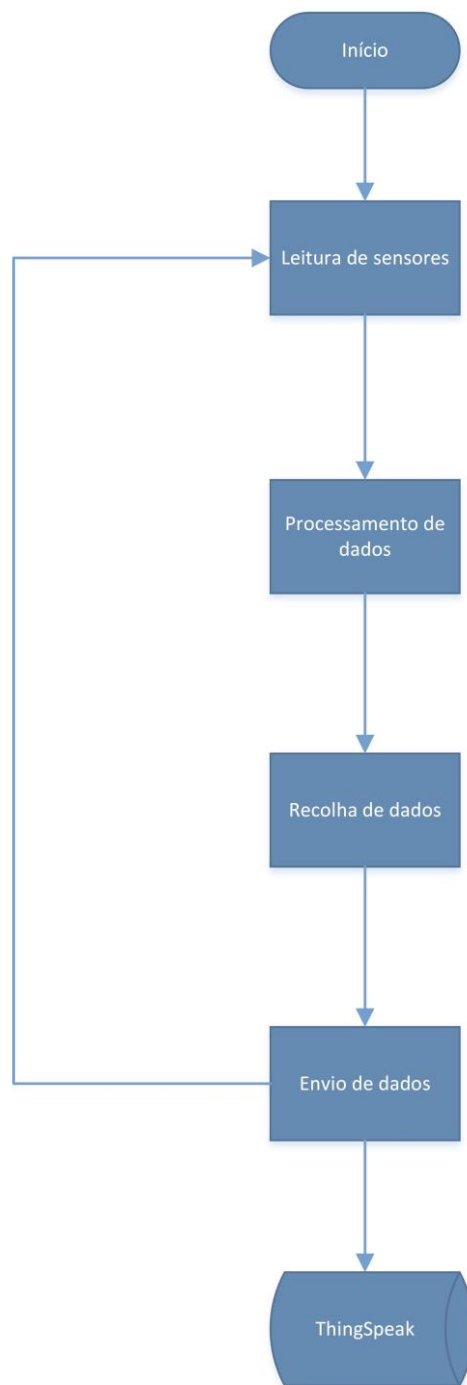


Figura 4.1 - Fluxograma do sistema desenvolvido.

4.2 Sensores

O presente subcapítulo foca-se nos parâmetros de estudo deste trabalho, nomeadamente, a corrente, tensão, temperatura e irradiância. São explicitados os sensores utilizados para cada um deles e o modo de leitura a eles associado.

4.2.1 Temperatura

Para os parâmetros de temperatura, foram utilizados quatro sensores DS18B20 de interface digital que podem comunicar através de um único fio, que estão destinados à temperatura do módulo e um sensor responsável pela temperatura ambiente. Cada um destes sensores possui um endereço específico, utilizado na obtenção da temperatura de cada sensor, ou seja, consoante o endereço acedido recebe-se o valor de temperatura correspondente. Este tipo de comunicação *One Wire* requer bibliotecas específicas que não estão disponíveis para a plataforma PSoC utilizada, logo foi necessário utilizar um dispositivo para efetuar uma interface com os sensores, o microcontrolador Atiny85. O diagrama de blocos do sensor utilizado pode ser observado na Figura 4.2. Estes sensores foram colocados em contato com as células fotovoltaicas, na parte de trás do módulo, através da cola quente.

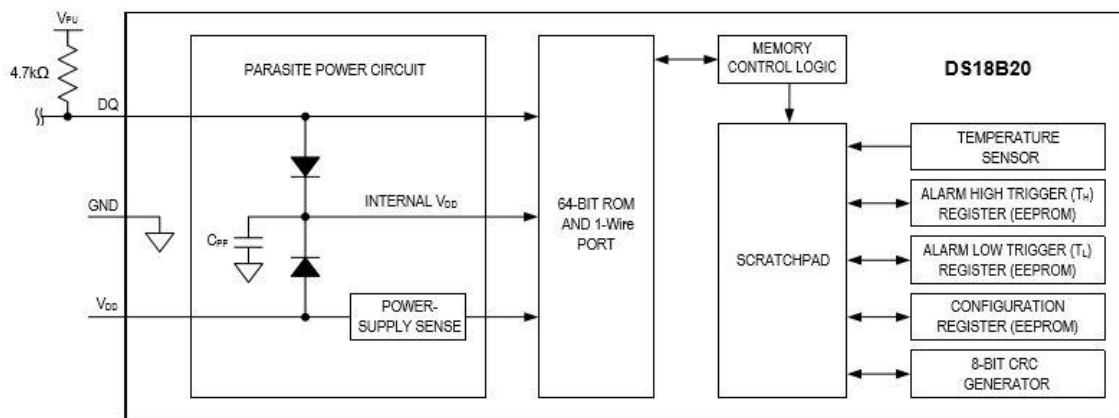


Figura 4.2 – Diagrama de blocos do sensor DS18B20, retirado de (Maxim Integrated, 2015).

4.2.2 Irradiância

Para além da temperatura do painel, a irradiância é um parâmetro que pode ser utilizado na comparação do valor teórico da temperatura com o valor efetivamente lido por cada um dos sensores. Através desta comparação consegue-se tirar conclusões tanto acerca do desempenho dos sensores, como também do funcionamento do próprio módulo. Inicialmente, foram

escolhidos sensores de intensidade luminosa PT550 de alta sensibilidade, interface analógica e com uma gama de 1 a 6000 lux. Apesar de apresentar os resultados em lux, foi utilizado como sensor de irradiância efetuando uma regressão linear tendo como base o aparelho DMB-Solar, mais propriamente, associando o nível de tensão à saída do sensor ao valor correspondente de irradiância disponibilizado no DMB-Solar. Pelo fato de esta opção não garantir valores fidedignos foi necessário substituí-lo por outro sensor, nomeadamente o sensor TSL235 que, de forma sucinta, converte a luz em frequência, ou seja, combina um fotodíodo e um conversor de corrente para frequência num único circuito integrado CMOS. A sua saída é uma onda quadrada (*duty-cycle* de 50 %) com uma frequência diretamente proporcional à irradiância no fotodíodo. O diagrama de blocos funcional deste sensor pode ser observado na Figura 4.3.

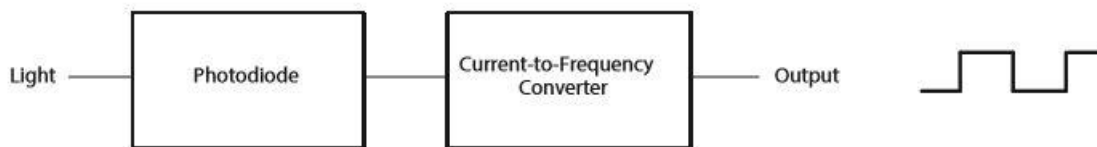


Figura 4.3 – Diagrama de blocos funcional do sensor TSL235, retirado de (Texas Solutions, 2017).

4.2.3 Corrente e tensão

A saída do módulo fotovoltaico apresenta valores de tensão e corrente contínuos. No estudo da corrente aos terminais do módulo foi selecionado o sensor ACS712, cujo diagrama de blocos está representado na Figura 4.4. É um sensor intrusivo, cujo processo de medição se baseia no efeito de Hall. Pelo fato deste sensor apenas funcionar para uma tensão de alimentação de 5 V e os microcontroladores utilizados operarem a 3.3 V foi necessário alimentá-lo com 5 V e efetuar um divisor de tensão para reduzir o valor de tensão inserido para leitura no microcontrolador.

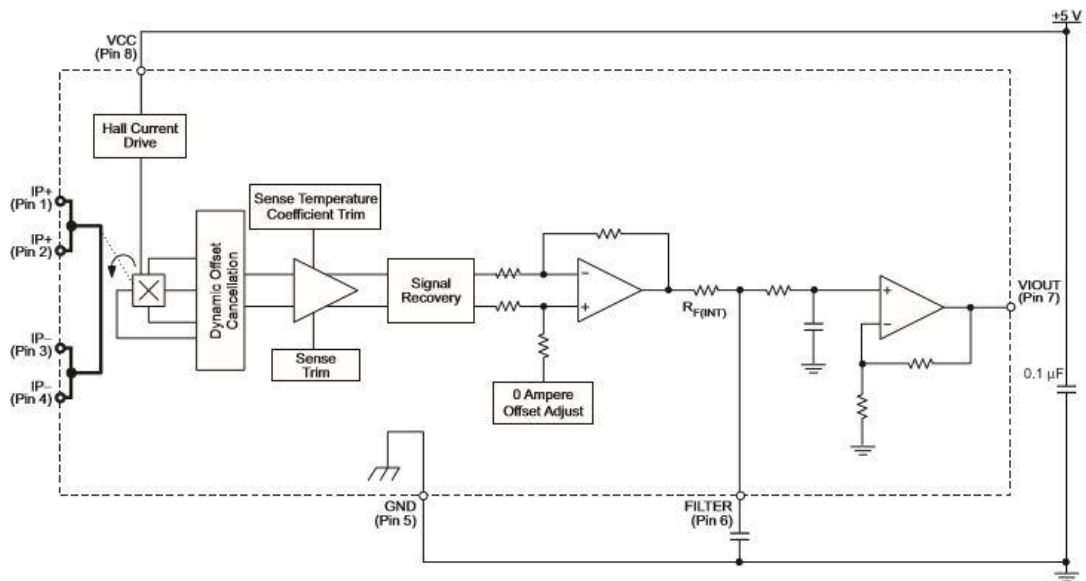


Figura 4.4 – Diagrama de blocos funcional do sensor ACS712, retirado de (Allegro MicroSystems, 2017).

Este processo de recolha de dados está detalhado no subcapítulo 5.1.

4.3 Microcontroladores

Neste subcapítulo são introduzidos os microcontroladores utilizados na presente dissertação, descrevendo o método utilizado para a leitura dos sensores, bem como o papel de cada microcontrolador neste processo.

4.3.1 ATtiny85

O método utilizado para a leitura dos sensores de temperatura, baseia-se numa comunicação *One Wire*. Desta forma procedeu-se à utilização de um microcontrolador ATtiny85, que é responsável pela leitura dos valores digitais, onde são requeridos os valores de cada um dos sensores e enviados byte a byte. É também responsável pela transmissão, através de comunicação I²C, desses dados para o módulo responsável pelo envio para o servidor. A sua programação é efetuada através do Arduino IDE (*software* do Arduino), devido às bibliotecas já existentes.

4.3.2 PSoC 5LP - CY8C5888LTI-LP097

A aquisição de dados teve por base o microcontrolador PSoC 5LP CY8C5888LTI-LP097 que a nível de hardware, possui todos os requisitos para este trabalho, como o ADC, comunicação I²C e Tx/Rx e memória. Com isto, a obtenção dos valores de irradiância, corrente e tensão do módulo são obtidas diretamente do PSoC, utilizando o ADC de 16 bits para efetuar a sua conversão de analógico para digital. Este valor é normalizado para uma tensão de 3.3 V e 2¹⁶ bit (ADC).

4.3.3 ESP32 Thing

A plataforma ESP32 é uma versão mais recente dos módulos da Espressif, que tal como a versão ESP8266, é uma boa alternativa para os projetos de IoT pela integração de comunicação série, I²C, SPI, integra vários protocolos de segurança como WEP, WPA, WPA2 e também pelo seu baixo consumo. A sua programação, à semelhança do ATtiny85, é feita através do Arduino IDE. Com a existência de comunicação entre os vários microcontroladores, é necessário estabelecer um modo de operação entre eles. Pela forma como o projeto foi estruturado, estabeleceu-se que o microcontrolador responsável pelo envio da informação para o servidor, ESP32, agisse como mestre, ou seja, é dele a responsabilidade de estabelecer comunicação com um dispositivo concreto através do seu endereço e recolher os dados dessa comunicação. Como já referido, para além do mestre existem os escravos, neste caso o ATtiny85 e o PSoC cuja principal função consiste na disponibilização de dados digitalizados ao seu mestre. Este processo de comunicação está detalhado no subcapítulo 4.4.

4.4 Comunicação entre microcontroladores

Após definido o papel de cada um dos módulos que integram o sistema desenvolvido, identificou-se o tipo de comunicação que mais se ajusta a este nível. Entre as opções disponibilizadas e analisando as suas características, percebe-se que a comunicação por porta série é uma comunicação assíncrona (sem dados de *clock*), o que dificulta a sincronização entre si, que poderá trazer erros de transmissão e causar distorção da informação. É também mais complexo a nível de software, uma vez que é necessário integrar pelo menos um bit de começo e outro de paragem em cada *frame* de dados, ou seja, é necessário despende tempo de transmissão de dez bits enquanto que só serão aproveitados oito bits dos dados enviados. Outra das dificuldades passa pela integração de múltiplos dispositivos no mesmo barramento de comunicação, pois neste aspeto pode-se enfrentar problemas de congestionamento, pois é um caso

que se deve analisar com extrema atenção para prevenir problemas nos dispositivos em questão. Por último, a taxa de transmissão de dados não tem limite teórico para comunicação série assíncrona, mas a maioria dos dispositivos apresenta um limite, normalmente cerca de 230400 bits por segundo. Para além da comunicação TX/RX, tem-se a comunicação SPI, que se destaca pela quantidade de pinos que necessita para estabelecer uma comunicação entre um único master e um único slave e requer um pino adicional I/O no master por cada slave acrescentado. Apesar de ser uma boa opção para elevadas taxas de transmissão full-duplex (envio e receção simultânea de dados), a tecnologia I²C concentra o melhor dos dois mundos, apresenta uma maior facilidade de integrar múltiplos componentes num único barramento de comunicação, pela rápida velocidade de transmissão e possui um protocolo de comunicação padrão que aumenta a compatibilidade entre diferentes implementações neste contexto. Esta comunicação utiliza apenas duas linhas de transmissão de sinais bidirecionais, nomeadamente Serial Data Line (SDA) e Serial Clock Line (SCL).

Com a escolha da comunicação I²C torna-se indispensável definir quais os módulos utilizados como mestre (Master) e os módulos que se comportam como escravos (Slave), representado na Figura 4.5. Pelo fato dos microcontroladores ATtiny85 e PSoC se limitarem à leitura e processamento de dados dos sensores não são preponderantes na coordenação de todo o sistema, ou seja, devem ser guiados por um outro módulo que lhes dê indicações de quando reagir. Assim, numa perspetiva de comunicação I²C, desempenham o papel de escravos, estando permanentemente à espera de ordem para poderem prosseguir com o envio de dados. Neste aspeto, destaca-se o módulo ESP32 cujo principal papel passa pela sincronização de todo o processo, inicialmente estabelece uma ligação com o PSoC para receber os dados referentes à irradiância, corrente e tensão e posteriormente ao ATtiny85 que é responsável pela leitura dos valores de temperaturas. É importante destacar a importância das resistências *pull-up*, R_P , usadas para prevenir estados de flutuação de tensão, garantindo o valor lógico correspondente à tensão de alimentação e permitindo estabelecer comunicação entre dispositivos diferentes, até mesmo com tensões de alimentação diferentes criando um ponto de referência comum, sendo que neste caso o *pull-up* será efetuado, normalmente, para o menor valor de V_{dd} .

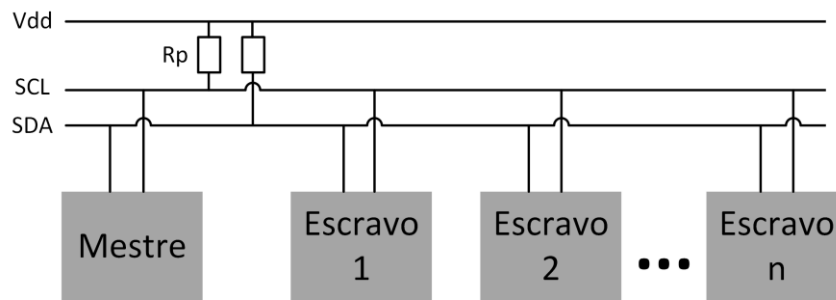


Figura 4.5 - Esquema de comunicação I²C.

4.5 Gestão e envio de dados

Neste subcapítulo é identificado o modo de envio dos dados para o servidor, nomeadamente o tipo de comunicação utilizado, o dispositivo utilizado nesta comunicação e o servidor escolhido para o registo de dados.

Na aquisição e tratamento de dados, a informação referente aos parâmetros estudados é agrupada e enviada segundo o protocolo definido nesta dissertação. Como já referido, a comunicação é efetuada independentemente entre o módulo ESP32 (master) e os microcontroladores utilizados como escravos, PSoC e ATtiny85. Pelo fato de serem comunicações independentes e a informação ser enviada byte a byte, foram definidos dois protocolos de envio de dados de forma a estabelecer qual o número de bytes referentes a cada um dos parâmetros. Em ambas as comunicações são enviados quatro bytes por cada parâmetro. Começando pela comunicação entre o ESP32 e o PSoC, são transmitidos os valores de irradiância, corrente e tensão, respetivamente. Quanto à comunicação entre o ESP32 e o ATtiny85 são transmitidos os cinco valores de temperatura, também adotando a mesma abordagem. A Figura 4.6 apresenta os dois protocolos definidos para cada uma das comunicações.

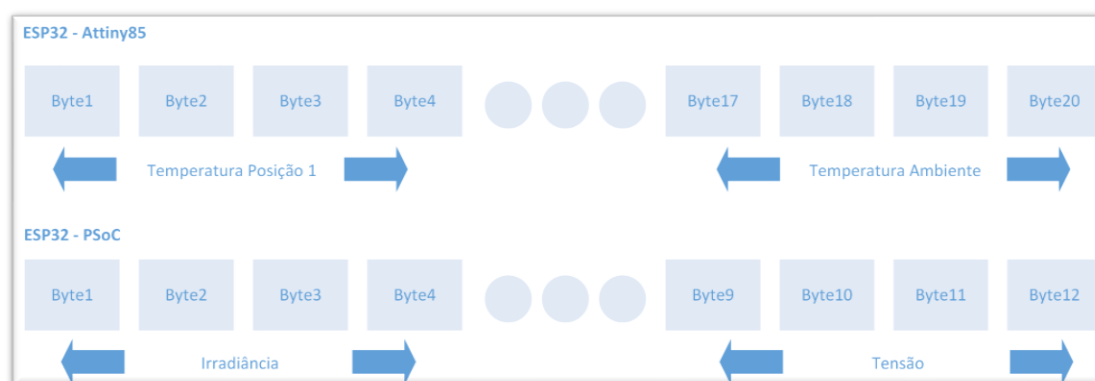


Figura 4.6 - Protocolo utilizado no envio de dados.

Nas plataformas PSoC e ATtiny85 é efetuada esta gestão de dados, cada um dos parâmetros é guardado na variável correspondente e arrumado num vetor para ser enviado. Este arranjo obedece a diversos critérios, desde a ordem pela qual estão situados cada um dos valores, ao número de bytes que se destina à sua interpretação. O processo é extremamente importante pois se algo não estiver de acordo com o protocolo estabelecido, a interpretação de resultados torna-se impossível. Após este processo segue-se o registo de dados no servidor online, pelo microcontrolador ESP32 através de comunicação *Wi-Fi*.

4.6 Desenvolvimento das placas de teste

O projeto foi desenvolvido por etapas testando cada um dos módulos que o compõem numa *breadboard* e com a utilização em simultâneo de uma fonte de tensão DC simulando o módulo fotovoltaico (tensão e corrente). Para as simulações iniciais, como já referido, recorreu-se a uma fonte de tensão DC e, após a calibração dos sensores, passou-se a utilizar o módulo fotovoltaico. Esta fase de simulação em *breadboard* trouxe resultados satisfatórios em termos de comunicação entre módulos e comunicação *Wi-Fi*, mas também para os valores dos parâmetros estudados. A Figura 4.7 apresenta a montagem utilizada na fase inicial da recolha de dados.

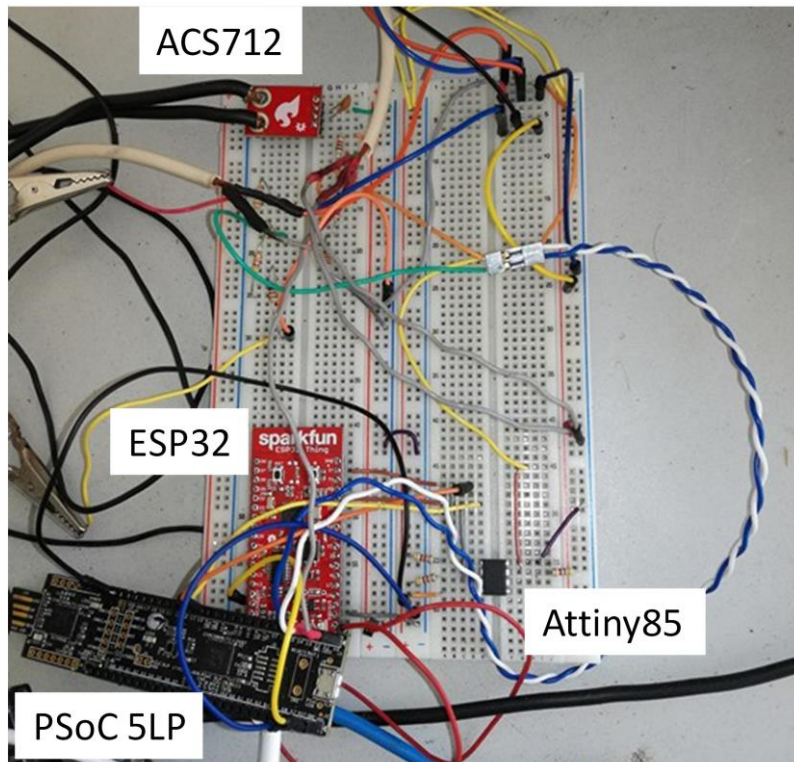


Figura 4.7 - Montagem utilizada nas experiências.

Para uma maior credibilidade em termos de projeto, procedeu-se de seguida à sua elaboração em placa de circuito impresso (PBC). Nesta fase notou-se uma correta comunicação entre módulos, mas surgiram problemas em termos de comunicação *Wi-Fi*, que pode ter sido consequência de uma danificação do componente de comunicação sem fios da plataforma ESP32, já que também se verificou problemas na comunicação *Bluetooth*. Pela impossibilidade de comunicação com o servidor, apenas foi possível efetuar um registo de dados via porta série para o computador. O protótipo desenvolvido em PCB pode ser observado na Figura 4.8. É possível identificar uma componente de potência, onde são usados cabos com maior diâmetro para suportar maiores valores da corrente proveniente do módulo fotovoltaico e que seguem para a carga, Figura 4.9 e Figura 4.10. Para a interface entre os sensores de temperatura e irradiância com o módulo desenvolvido, utilizou-se conectores Jack, Figura 4.11, que possuem três fios condutores, que são usados para ligação à alimentação (Vdd), *ground* (GND) e transmissão do sinal. Entre estes, existem isolantes que evitam o contato entre si. Todo este processo levou à criação do protótipo apresentado na Figura 4.12.

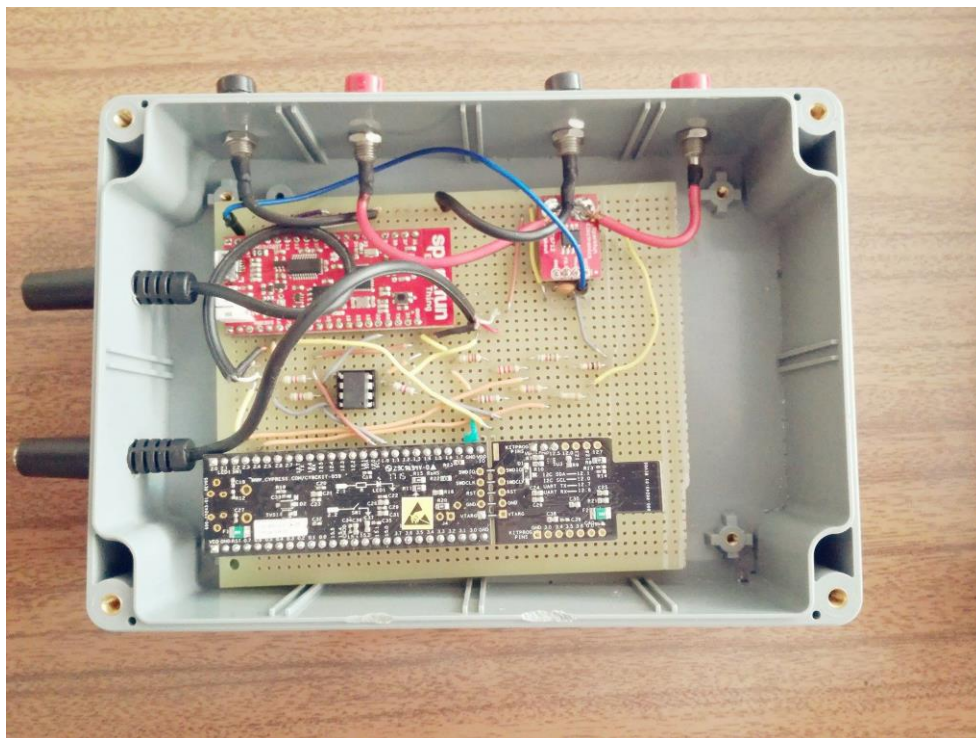


Figura 4.8 - Protótipo desenvolvido em PCB.

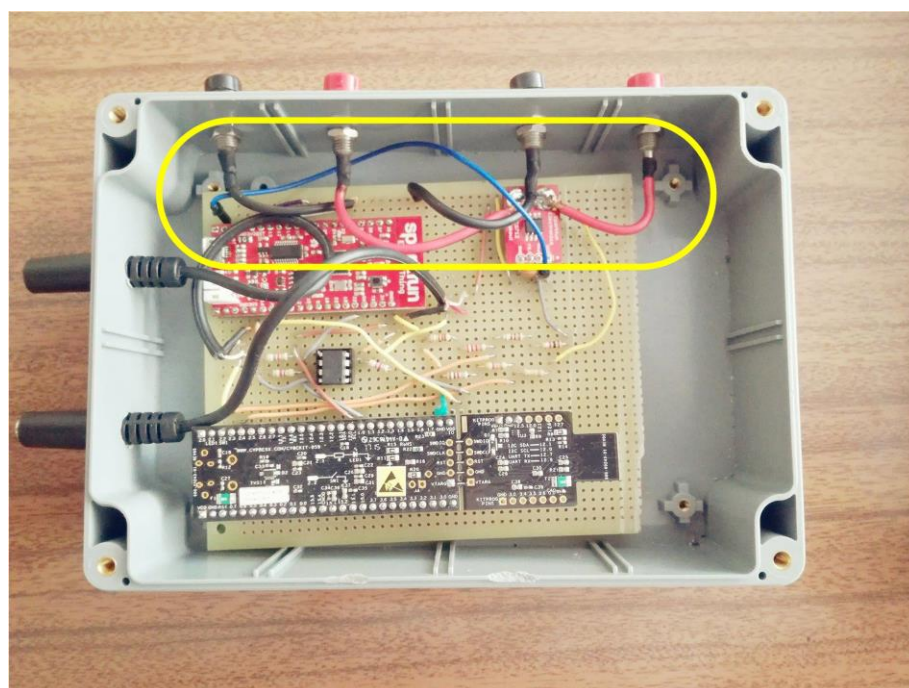


Figura 4.9 – Circuito de potência do protótipo.



Figura 4.10 - Conectores de ligação ao módulo e à carga.

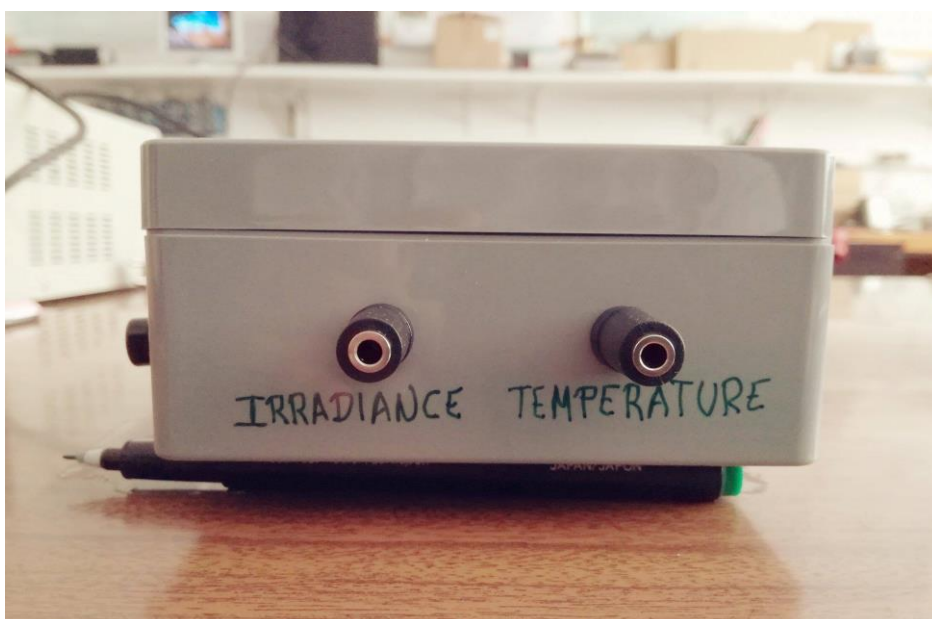


Figura 4.11 – Conectores de ligação aos sensores.



Figura 4.12 - Protótipo final

A infraestrutura desenvolvida nesta dissertação é de utilização simples e com uma interface intuitiva, facultando ao utilizador o estado de funcionamento do módulo a ela associado, podendo assim detetar anomalias precocemente e contribuir para aumentar a eficiência global das instalações onde está inserido.

5 Procedimento e análise de resultados

Serve o presente capítulo para introduzir os procedimentos que permitiram a calibração dos sensores e ao processamento de dados para uma maior aproximação aos dados reais, bem como a análise dos resultados experimentais que serve como base para a validação do sistema implementado, através dos testes realizados a cada um dos módulos que compõem o equipamento e dos testes efetuados ao protótipo final.

5.1 Processamento e calibração

A informação disponibilizada na saída dos sensores é fornecida em valores de tensão, sendo necessária uma fase de processamento desses mesmos valores, para o conhecimento do parâmetro que se quer efetivamente medir. Além disso os resultados obtidos apresentam diferenças face aos valores reais, onde é necessário efetuar uma calibração do sensor. Neste subcapítulo está descrito todo o processo de tratamento de dados e calibração dos sensores.

Começando pelos parâmetros ambientais, a obtenção de cada um dos valores de temperatura é efetuada pelo microcontrolador ATtiny85. A utilização deste dispositivo é necessária pelo fato dos sensores apresentarem saídas digitais e permitirem uma comunicação com um único fio, através de endereços específicos. Inicialmente procedeu-se à leitura destes sensores diretamente com a plataforma PSoC, mas devido à ausência de bibliotecas indispensáveis para este processo, não foi possível a leitura de vários valores de temperatura, mas apenas de um. Este conceito de comunicação *One Wire* é fundamental neste aspeto da dissertação, devido à sua facilidade de

disposição dos sensores no painel e à sua leitura dispondo apenas de um fio. Foi então necessário encontrar uma solução para efetuar estas leituras, onde se escolheu um dispositivo de baixo consumo que permite comunicar tanto via One Wire como também por comunicação I²C. Nesta altura, e com o auxílio do Arduino IDE procedeu-se à sua programação. Inicialmente é definido o endereço do dispositivo e o pino para comunicação *One Wire*. Após a inicialização dos sensores e da comunicação, o dispositivo (slave), aguarda por um pedido de comunicação, momento em que inicia o envio dos valores dos sensores de temperatura, byte a byte, por comunicação I²C. O valor das temperaturas é pedido pelo ESP32 (master) que reconstrói o valor da temperatura a cada 4 bytes recebidos, uma vez que o formato *float* corresponde a 4 bytes.

A equação do modelo para o cálculo da irradiância foi implementada através da ferramenta Microsoft Excel. Neste processo de calibração recorreu-se ao sensor DMB-Solar para estabelecer uma ligação entre a irradiância local (disponibilizada pelo mesmo) e o valor de tensão do sensor de intensidade luminosa. Ambos os recetores foram colocados lado a lado (para minimizar o erro), foram registados os valores iniciais de cada um dos equipamentos e procedeu-se a uma variação da radiação incidente nos sensores, através do aumento da intensidade luminosa de uma lâmpada que aproxima o comportamento do sol. Como já referido, os valores foram registados para diferentes níveis de intensidade luminosa tendo-se obtido um gráfico da irradiância no local em função da tensão disponibilizada pelo sensor PT550. Através deste gráfico, foi obtida função polinomial que aproxima a curva, tendo sido utilizada para a conversão da tensão em irradiância. Pelo fato do sensor PT550 ser extremamente sensível a variações de posição e o aparelho DMB-Solar não detetar qualquer valor de irradiância em divisões interiores ao contrário do sensor, os primeiros ensaios não saíram como esperado, uma vez que o erro existente entre os valores correspondentes à irradiância aumentava à medida que se ampliava a intensidade da luz. Neste ensaio, a reta curva que aproximava o gráfico E_i (V), Figura 5.1, não correspondia de fato ao comportamento verificado nas experiências realizadas no exterior.

$$G = 0.0314 \times V^{-3.292} \quad 5.1$$

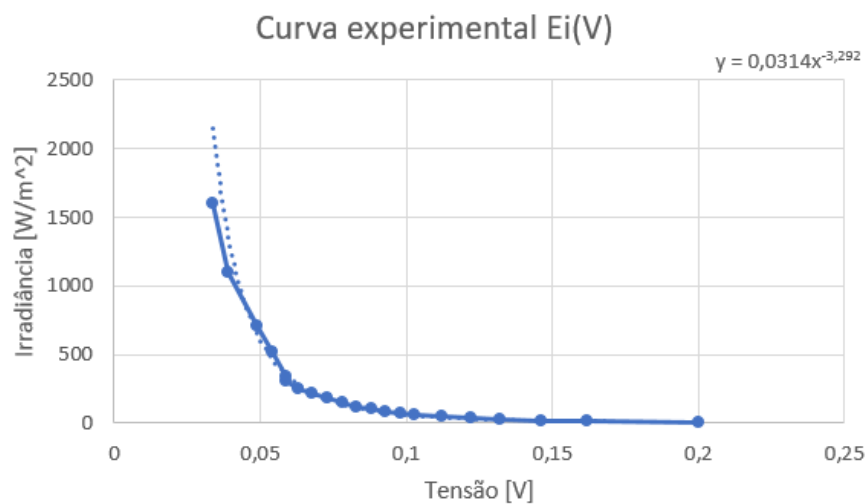


Figura 5.1 – Irradiância, curva experimental.

Após a realização destas experiências notou-se uma alta sensibilidade face ao ângulo de disposição do sensor, inferior a 10° , o que se revela uma característica limitante para a sua utilização no sistema final, atendendo que seria impraticável limitar a sua disposição a um valor específico de ângulo. Surgiu a necessidade de encontrar outro sensor que garantisse melhores resultados, o caso do sensor TSL235R que fornece um sinal de saída com uma frequência proporcional ao nível de irradiância, como se pode observar na Figura 5.2.

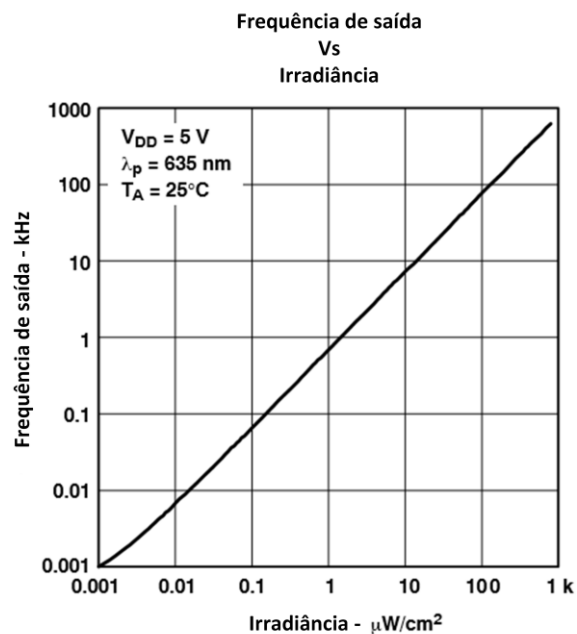


Figura 5.2 - Frequência de saída em função da irradiância, adaptado de (Texas Solutions, 2017).

Este procedimento foi implementado com o microcontrolador PSoC, através de um PWM que gera um sinal com um *duty cycle* de 50 % e um período de 100 ms. Através da inserção deste sinal num contador pode-se contar quantas vezes o sinal de entrada apresenta o nível ‘HIGH’ durante o período em que o sinal do PWM se encontra também no nível ‘HIGH’. Pelo fato de a frequência ser expressa em Hz (ciclos por segundo) multiplica-se o valor resultante pela constante 10 para se considerar uma janela de 1 segundo (10×100 ms). A Figura 5.3 mostra o método utilizado neste cálculo.

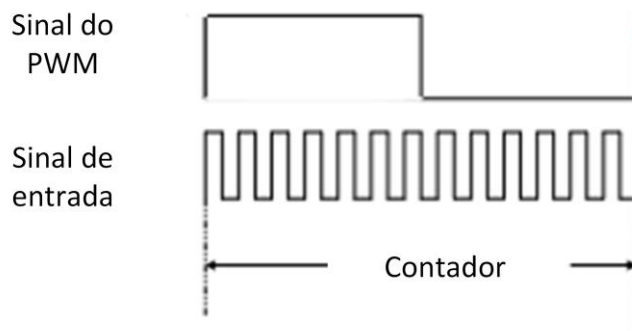


Figura 5.3 - Método utilizado para o cálculo da irradiância, adaptado de (Texas Solutions, 2017).

Este processo segue os seguintes passos:

- O PWM começa a contar de forma descendente de 9999 (período definido).
- A saída está configurada para comparar com o valor 4999, com uma comparação do tipo inferior ou igual.
- Quando esta contagem alcança o valor 4999 retorna o valor ‘True’ e consequentemente gera-se um nível ‘HIGH’.
- O PWM continua com o nível ‘HIGH’ até a contagem chegar a 0.
- Quando a contagem chega a 0, o PWM começa novamente a contar desde 9999. Isto gera um sinal de saída com uma largura de pulso de 5000 ciclos de *clock* (50 ms).

$$T_{PWM} = 100 \text{ ms}$$

Este processo requer um pulso de 50 ms pelas seguintes razões:

- O sinal de período 50 ms é fornecido ao sinal de captura do contador.
- Quando se nota um ciclo no sinal de captura, o contador regista o valor da contagem e reinicia.

- Uma captura ocorre quando existe pelo menos dois ciclos na entrada do contador e o sinal da captura está a 'HIGH'. Quando a captura está a 'HIGH' durante 50 ms, pode-se medir frequências de 20 Hz até 8 MHz.
- O valor do contador de captura é o número de subidas em 100 ms, sendo este valor utilizado para calcular o número de ciclos por segundo.

É de notar que na fase de testes este processo revelou-se eficaz para um sinal de período constante, mas para o sinal à saída do sensor apresentou uma vasta discrepância de valores.

Quanto aos parâmetros intrínsecos do módulo, teve-se em conta a disponibilização de valores contínuos pois o foco de estudo é a saída do módulo e não a saída do inversor. Na fase de recolha do valor de corrente, recorre-se ao ADC do PSoC, que converte o valor analógico lido em valor digital, resultando no valor aproximado da tensão DC à saída do módulo. Utilizou-se um conversor A/D de 16 bits, preparado para um sinal de entrada analógico de tensão variável entre 0 V e 3.3 V, ou seja, é capaz de capturar 65536 níveis discretos de um determinado sinal. Por exemplo, se o sinal de entrada de conversor A/D estiver a 1.65 V, o valor binário gerado será 32768.

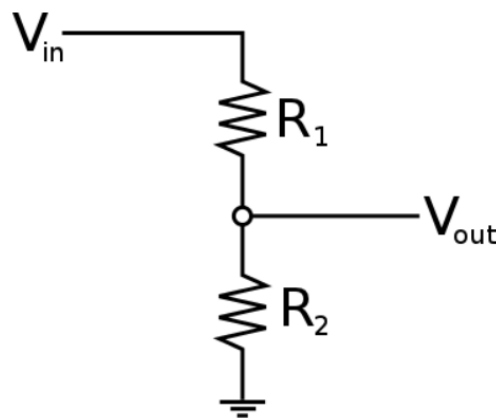


Figura 5.4 - Divisor de tensão.

Na Figura 5.4 está representado o método utilizado neste processo, que origina a seguinte expressão,

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad 5.2$$

Efetuando o cálculo para o pior caso ($V_{out} = 3.3 \text{ V}$ e $V_{in} = 5 \text{ V}$),

$$3.3 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 5 \quad 5.3$$

E tomando o valor de R_1 igual a $1.8 \text{ k}\Omega$,

$$R_1 = 3.49 \text{ k}\Omega \quad 5.4$$

Desta forma, a tensão de saída está limitada a 3.3 V e pode agora ser introduzido para leitura no PSoC, sendo utilizada para obtenção do valor real à saída do sensor e posteriormente no cálculo do valor de corrente, tendo em conta o valor de mV por cada A do sensor utilizado (ACS712), neste caso 185 mV/A ,

$$V_{in} = \frac{V_{out}}{\frac{R_2}{R_1 + R_2}} \quad 5.5$$

$$I_{\text{módulo}} = \frac{V_{in}}{185} \quad 5.6$$

Pelas definições do fabricante, este sensor coloca na sua saída uma tensão de 2.5 V quando não existe passagem de corrente. Portanto para a medição da corrente, retira-se esse valor de tensão e calcula-se o valor de corrente correspondente. Pelo fato do valor da tensão de alimentação de sensor não ser exatamente 5 V e existirem pequenos erros inerentes tanto aos constituintes do sensor, como dos componentes do divisor de tensão, existe uma pequena discrepância entre o valor real e o valor efetivamente medido. Como essa discrepância é semelhante para várias gamas de valores de tensão, foi necessário retirar o valor de *offset* associado, obtendo desta forma um valor mais próximo do valor real. É de notar que este *offset* é diferente para diferentes fontes de alimentação, sendo necessário o seu ajuste com a alteração da fonte de alimentação.

Tal como para a corrente, para a tensão à saída do módulo recorreu-se a um divisor de tensão para efetuar uma redução da tensão, visto que no pior caso a tensão à saída do módulo pode atingir 21.5 V , tensão de circuito aberto. Como no caso anterior tem-se,

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad 5.7$$

Efetuando o cálculo para $V_{out} = 3.3 \text{ V}$ e $V_{in} = 21.5 \text{ V}$,

$$3.3 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 21.5 \quad 5.8$$

E tomando o valor de R_1 igual a $390\text{ k}\Omega$,

$$R_2 = 70.7\text{ k}\Omega \quad 5.9$$

Chegando ao valor de tensão à saída do módulo,

$$V_{\text{módulo}} = \frac{V_{out}}{\frac{R_2}{R_1 + R_2}} \quad 5.10$$

Com a realização da experiência no exterior notou-se, para valores superiores a 14 V aos terminais do módulo, uma saturação do ADC do PSoC levando à impossibilidade da sua leitura. Como esta situação apenas se verificou para valor superiores, o dimensionamento foi projetado para uma tensão de 30 V, valor irrealista uma vez que o máximo valor que pode tomar é a tensão de circuito aberto ($V_{ca} = 21.5\text{ V}$), obtendo uma janela de trabalho maior e consequentemente menores valores de tensão à entrada do PSoC para os mesmos níveis de tensão do módulo.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in} \quad 5.11$$

Efetuando o cálculo para $V_{out} = 3.3\text{ V}$ e $V_{in} = 30\text{ V}$,

$$3.3 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 30 \quad 5.12$$

E tomando o valor de R_1 igual a $390\text{ k}\Omega$,

$$R_2 = 48.2\text{ k}\Omega \quad 5.13$$

Para melhorar os resultados obtidos para estes parâmetros aplicou-se um filtro passa-baixo, através da recolha de 20000 pontos e o cálculo da respetiva média.

5.2 Resultados

Como referido na introdução ao capítulo, a observação de resultados permite uma apreciação ao projeto implementado. Os resultados foram obtidos em testes elaborados no exterior, que servem como base para uma crítica acerca da abordagem seguida na fase de recolha de dados, fazendo uma comparação com valores teóricos.

Devido à impossibilidade de conexão do protótipo desenvolvido ao servidor a recolha de dados foi efetuada através de comunicação porta série para o computador. Com os resultados recolhidos pode ser feita uma análise a cada um dos parâmetros e verificar se estão de acordo com os resultados espectáveis, analisando diversas situações com o intuito de perceber o estado de funcionamento do equipamento. Esta comparação de dados serve para identificar o comportamento do módulo face a possíveis sombreamentos, com o sombreamento das células foco, os valores de tensão e corrente do painel, para assinalar o ponto de funcionamento do mesmo, e também uma comparação entre temperaturas das células e a temperatura teórica previamente calculada.

A análise de dados é realizada remotamente através de uma aplicação implementada em Matlab® e Microsoft Excel, para cálculos experimentais e elaboração de gráficos apresentados ao longo deste subcapítulo.

Temperatura das células foco

Neste estudo, como referido no Capítulo 2, existem quatro pontos de interesse que foram numerados de acordo com a Figura 5.5.



Figura 5.5 - Identificação dos pontos de estudo no módulo.

Com o intuito de analisar a temperatura das células, foram recolhidos os valores dos quatro sensores de temperatura das células, o de temperatura ambiente e o valor de irradiância. Estes

dois últimos valores são utilizados para o cálculo teórico do valor de temperatura da célula, através da expressão 3.1, com $NOCT = 45$. Efetuado o cálculo, pode-se comparar os valores de temperatura de cada uma das células com o valor teórico, resultando no gráfico apresentado na Figura 5.6.

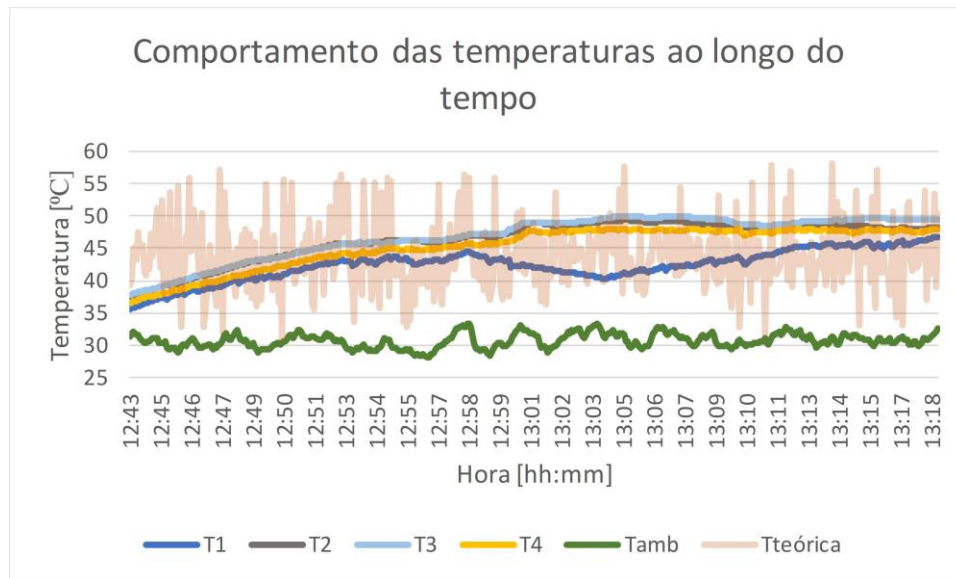


Figura 5.6 - Comparação entre a temperatura teórica das células e a temperatura experimental.

Analisando a Figura 5.6 percebe-se que as curvas alusivas às temperaturas experimentais de cada uma das células, referentes ao dia 21 de Julho de 2017, seguem um comportamento idêntico até as 12h:58m (momento em que se efetuou um sombreamento), apesar de se notar uma ligeira alteração de temperaturas ponto a ponto. Esta diferença deve-se ao fato da a temperatura não ser uniforme ao longo da superfície do módulo, já que existe uma dependência direta da intensidade de radiação solar incidente nas diferentes áreas estudadas. O fato dos sensores não serem sensores de contato insere também um grau de incerteza, pois a área de contato com a célula varia para cada caso. A curva referente à temperatura teórica possui variações assinaláveis que são provocadas pelos valores de irradiação que tomam valores completamente distantes da linha de tendência refletindo-se diretamente no comportamento desta curva. Esta discrepância de valores é motivada por problemas não identificados inerentes ao sensor utilizado, o que inviabiliza conclusões baseadas neste parâmetro. As medições começaram com a colocação do módulo num local sem radiação solar, dispondo-o posteriormente ao sol, situação que se pode verificar pela subida da temperatura das células começando a acompanhar a linha de tendência da curva teórica da temperatura das células.

Influência do sombreamento da célula

Os fatores de sombreamento podem ser dos mais diversos tipos, desde as nuvens à sujidade no módulo, que têm uma influência direta no rendimento do módulo e que pode levar à sua degradação, já que conduzem ao aumento da temperatura da(s) célula(s) sombreada(s).

No seguimento deste estudo sombreou-se com um pano, para evitar o máximo possível a passagem de radiação, a célula referente à posição 1 e, como se pode observar na Figura 5.7, a temperatura das células revela um comportamento ascendente até ao momento em que a posição 1 foi sombreada. A partir das 12h:58m a célula situada na posição sombreada começou a arrefecer, notando-se um aumento nas restantes temperaturas. Com a retirada do pano, a temperatura volta a subir. Estes resultados mostram que existe uma relação direta entre os sombreamentos e a temperatura do módulo, o que se pode tornar num foco de estudo para trabalhos posteriores.

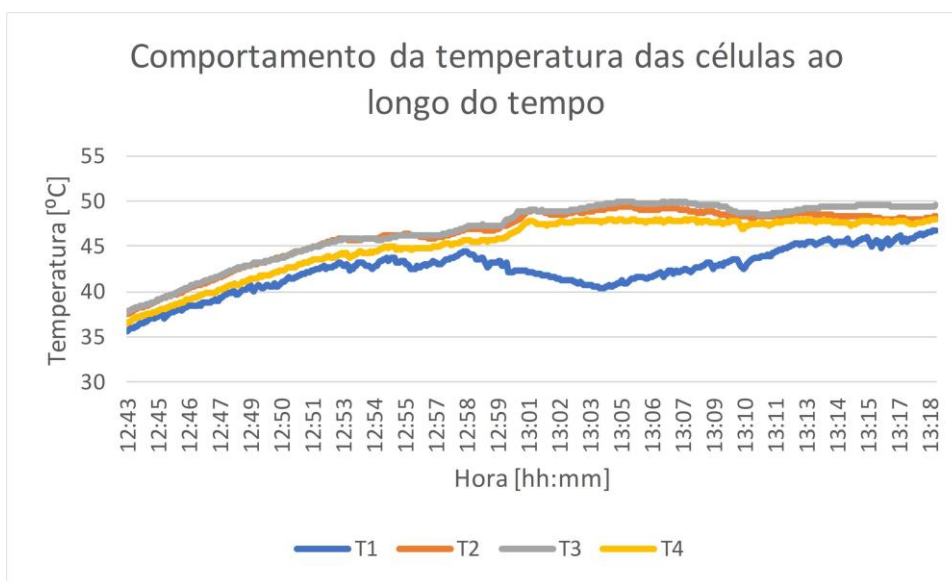


Figura 5.7 - Temperatura das células, com sombreamento de T1.

Notou-se também uma queda de corrente de cerca de 0.5 A e uma queda de tensão de aproximadamente 2.5 V, visível na Figura 5.8 e Figura 5.9. Nos seguintes gráficos é também possível identificar os diferentes modos de funcionamento tanto para diferentes valores de carga, como também instantes em que o módulo está em circuito aberto, ou seja, ausência de corrente.

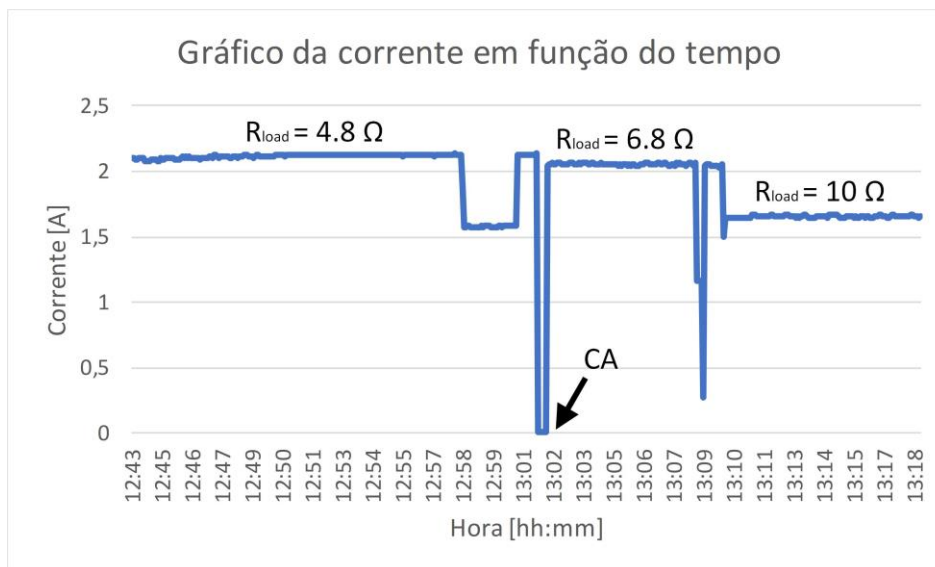


Figura 5.8 - Comportamento da corrente com sombreamento da posição 1.

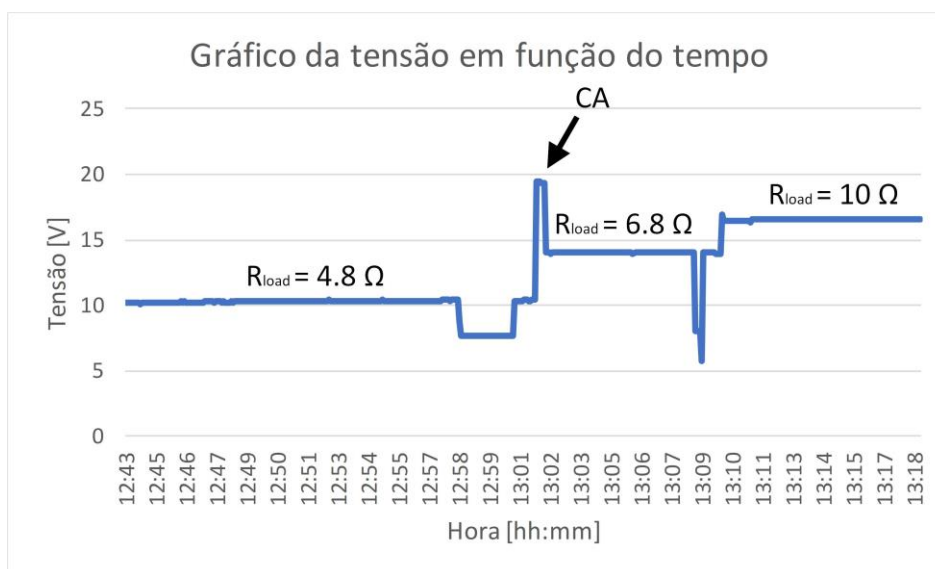


Figura 5.9 - Comportamento da tensão com sombreamento da posição 1.

Ponto de funcionamento

O módulo fotovoltaico utilizado, modelo KC40, apresenta uma curva característica I-V diferente para determinadas condições de temperatura ambiente, temperatura das células e irradiância, como exemplificado na Figura 5.10 e Figura 5.11.

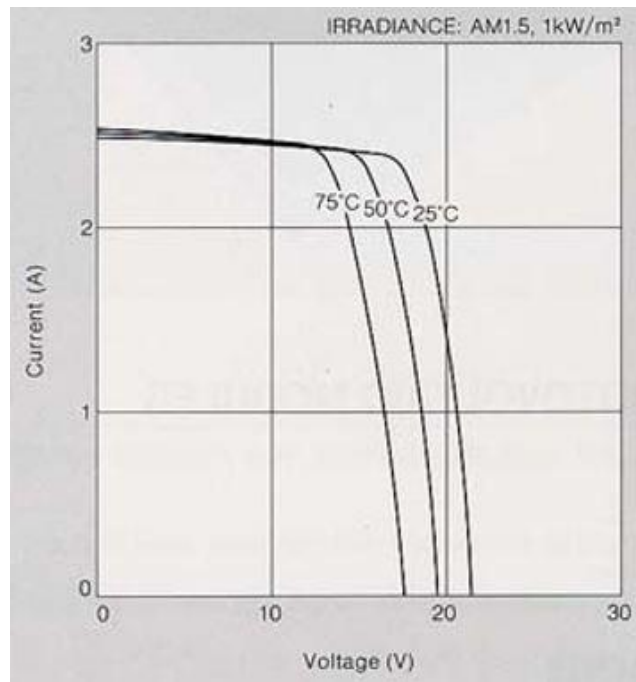


Figura 5.10 - Variação da curva I-V para diferentes temperaturas, retirado de (Kyocera).

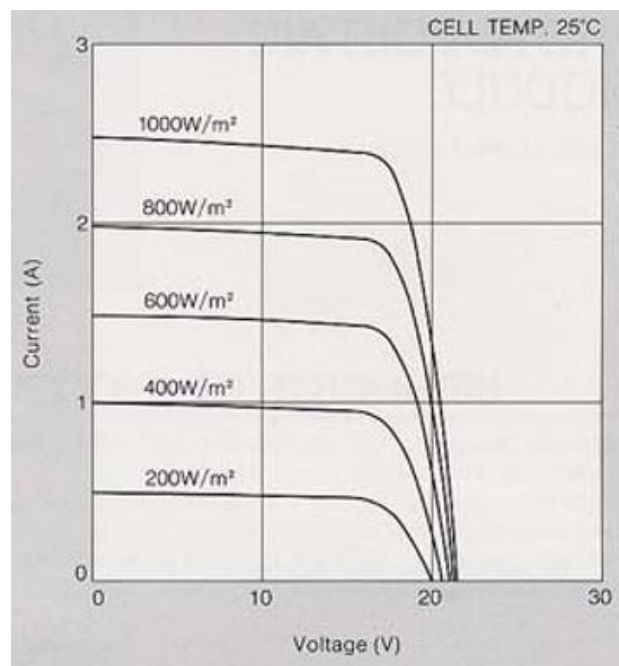


Figura 5.11 - Variação da curva I-V para diferentes condições de irradiância, retirado de (Kyocera).

Pode-se então perceber qual o ponto de funcionamento do módulo fotovoltaico, sem introdução de um inversor e, portanto, fora do ponto de máxima potência, MPPT. Nesta experiência, começou-se por colocar o módulo ligado a uma carga de resistência $R=4.8\ \Omega$ e retirar os valores de corrente e tensão aos seus terminais, de seguida aumentou-se o valor da sua

resistência para $R=6.8\ \Omega$ e $R=10\ \Omega$ de forma a observar os pontos de funcionamento para diferentes tipos de carga, Figura 5.12. Pode-se comparar estes resultados com os gráficos característicos disponibilizados pelo fabricante, mas apenas para curvas referentes a iguais níveis de irradiância, daí a importância do sensor de irradiância nesta fase. Pode-se também concluir acerca da extrema importância da colocação do inversor para que se consiga operar no MPPT e conseguir aproximar a produção de energia da sua máxima capacidade.

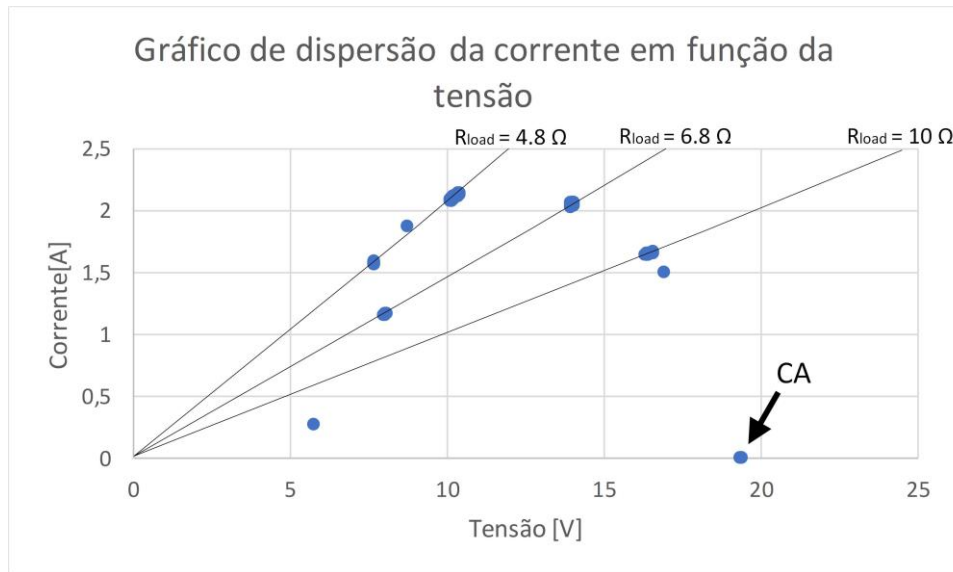


Figura 5.12 - Gráfico de dispersão da corrente em função da tensão.

A Figura 5.13 exemplifica uma possível ligação do equipamento desenvolvido nesta dissertação.

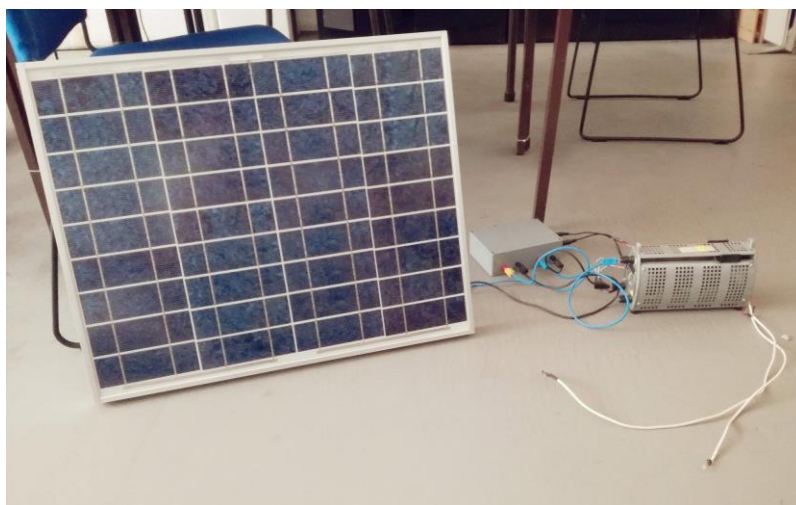


Figura 5.13 – Imagem ilustrativa da ligação entre o protótipo, o módulo PV, carga e sensores.

6 Conclusões

Ao longo desta dissertação foi apresentada uma infraestrutura para *Smart PV* com o intuito de adquirir informação à cerca do seu desempenho e tendo como principal finalidade o desenvolvimento de um equipamento completamente autossustentável para integração em instalações fotovoltaicas, num paradigma de *IoT* e sistemas ciberfísicos.

A estrutura do sistema teve por base três microcontroladores, que comunicam entre si através de comunicação I²C e integra uma componente de comunicação Wi-Fi para registo de dados no servidor ThingSpeak. O conceito aqui apresentado divide-se em três camadas: a camada física onde estão integrados os sensores e microcontroladores; a camada de informação onde são geridos todos os dados; a camada de serviço representada pela base de dados, que não foi completamente desenvolvida nesta parte do projeto. A conjugação destas camadas resultou numa estrutura capaz de adquirir e tratar dados e efetuar a sua gestão e registo.

Com a conclusão do projeto, segue-se uma análise acerca do desempenho do mesmo onde serão apresentadas as seguintes conclusões.

6.1 Sinopse

A monitorização de uma instalação fotovoltaica tem um impacto notável na sua eficiência. Neste contexto, os sistemas de monitorização de vários sensores e baixo custo, revelam-se uma solução adequada para uma monitorização em tempo real. O principal objetivo consiste em

estudar o nível de eficiência dos painéis fotovoltaicos, fornecendo dados úteis para investigar as causas de perdas de eficiência.

A implementação de um sistema de monitorização que possui vários sensores, permite ter um conhecimento mais completo do módulo, face a outros equipamento presentes no mercado, com conhecimento de parâmetros fundamentais na sua caracterização, como é o caso da tensão e corrente. Para além dos parâmetros intrínsecos do módulo, a temperatura das suas células revela muito sobre o seu estado de funcionamento, sendo neste caso necessário saber a temperatura ambiente e irradiância, também disponibilizados por sensores, para comparar com os resultados teóricos esperados. É nesta perspetiva que foi concebido o projeto descrito nesta dissertação, um equipamento de apoio a sistemas fotovoltaicos inteligentes que facilita o acesso aos seus dados e contribui para uma simplificação de processos que poderiam ser morosos.

Pelo fato dos sensores utilizados para medição das temperaturas não serem sensores de contato, os dados associados poderiam apresentar uma maior uniformidade, já que pela forma como estão colocados a área de contato varia de sensor para sensor, o que leva a uma introdução de erro. A irradiância é calculada através dos valores de frequência do sinal à saída do sensor, que depende diretamente da intensidade da luz incidente. A disposição do sensor tem influência nestes resultados uma vez que a intensidade de luz incidente varia consoante a sua disposição, fato que leva também a uma introdução de erro nos valores medidos. Como a tensão e corrente são medidas com o auxílio de um divisor de tensão, insere também a uma alteração de valores devido às limitações físicas do material e no processamento de dados pelo microcontrolador.

Os testes realizados para análise ao desempenho do sistema permitiram concluir que apesar dos erros já identificados, apresenta resultados muitos satisfatórios que permitem tirar conclusões acerca do desempenho do módulo e que com algumas melhorias poderá cumprir os requisitos para servir como base de um sistema fotovoltaico inteligente.

Em suma, a utilização deste tipo de equipamentos permite conhecer o estado de funcionamento do módulo a ele associado, podendo assim detetar anomalias precocemente e contribuir para aumentar a eficiência global das instalações onde está inserido. Uma vez que, sem estes equipamentos numa instalação, pode ser mais difícil a identificação de erros levando a perdas de energia que podem ser significativas.

6.2 Trabalho Futuro

Com base nos resultados experimentais deste projeto, são notórias algumas otimizações a nível de *hardware*, nos sensores utilizados como também a nível de *software*, nos algoritmos utilizados para o processamento de dados. Estas otimizações permitirão um aumento da precisão dos dados e uma maior fidedignidade a este projeto.

A nível de arquitetura, seria expectável aumentar o nível de complexidade da camada de serviço, através da disponibilização de serviços, como implementação de um serviço de alertas. A introdução de novos serviços viria a colmatar algumas lacunas deste projeto, pois nesta vertente apenas existe a disponibilização de dados num servidor online, para integração da componente de dados como serviço. A nível da camada de informação deve ser efetuada uma análise de dados antes de serem enviados para a camada seguinte para haver uma maior confiabilidade de resultados. A nível de camada física, como já referido, passa pela substituição dos sensores por outros mais adequados às tarefas, como é o caso dos DS18B20 que podem ser substituídos por sensores de contato. Será também necessário encontrar uma solução para os problemas de comunicação *Wi-Fi* identificados, já que sem esta vertente não se consegue tornar o sistema completamente autónomo pelo fato de não ser possível observar os valores recolhidos por outro meio que não porta série, cuja ligação alimenta por si só o protótipo.

Por fim, com vista à otimização energética, a procura por uma solução com menos microcontroladores que seja suficiente para as necessidades do sistema, pode permitir uma redução do consumo energético, apesar da solução apresentada não apresentar um consumo substancial.

Referências

- Akyildiz, I. F. *et al.* (2010) ‘A Survey on Sensor NetWorks’, *IEEE Wireless Communications*, (February), pp. 104–111. doi: 10.1109/MWC.2009.5361183.
- Allegro MicroSystems (2017) *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. (Acedido: 21 Julho 2017).
- Archer, M. D. and Green, M. A. (2014) *Clean Electricity from Photovoltaics*. Imperial College Press (Series on Photoconversion of Solar Energy). doi: 10.1142/p798.
- Atmel (2015) *ATMEL 8-Bit Microcontroller With 4/8/16/32Kbytes In-System Programmable Flash*. (Acedido: 21 Julho 2017).
- Bagheri, B. *et al.* (2015) ‘Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment’, *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier Ltd., 28(3), pp. 1622–1627. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.318.
- Castro, R. M. G. (2002) ‘Introdução à Energia Fotovoltaica’, *Instituto Superior Técnico DEEC*, 2002 (edição 0).
- Christin, D. *et al.* (2009) ‘Wireless Sensor Networks and the Internet of Things : Selected Challenges’, *Structural Health Monitoring*, 5970, pp. 31–33. doi: 10.1007/978-3-642-11917-0.
- Cristaldi, L., Faifer, M. and Lazzaroni, M. (2016) ‘A cooperative monitoring and diagnostic architecture for PV systems’, *SAS 2016 - Sensors Applications Symposium, Proceedings*, pp. 268–273. doi: 10.1109/SAS.2016.7479857.
- Cypress (2017) *32-bit ARM® Cortex®-M3 PSoC® 5LP*. Disponível em: <http://www.cypress.com/products/32-bit-arm-cortex-m3-psoc-5lp> (Acedido: 21 Julho 2017).
- Emilio, M. and Aurizio, M. (2013) ‘Data acquisition systems’. (Acedido: 17 Novembro 2016)

Freitas, S. S. A. (2008) 'Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos Engenharia Industrial Engenharia Electrotécnica'. (Acedido: 17 Novembro 2016)

Green, M. A. (2003) *Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion*, Springer. (Acedido: 17 Novembro 2016)

Hu, L. *et al.* (2012) 'Review of cyber-physical system architecture', *Proceedings - 2012 15th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops, ISORCW 2012*, pp. 25–30. doi: 10.1109/ISORCW.2012.15.

IEC (2009) *IEC 60891 : 2009 Photovoltaic devices — Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*.

Kuzlu, M. *et al.* (2011) 'Design of wireless smart metering system based on MSP430 MCU and ZigBee for residential application', p. II-255-II-258.

Kyocera (no date) *High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module*. Disponível em: <https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/KC40.pdf> (Acedido: 21 Julho 2017).

La, H. J. and Kim, S. D. (2010) 'A Service-Based Approach to Designing Cyber Physical Systems', *2010 IEEE/ACIS 9th International Conference on Computer and Information Science*, pp. 895–900. doi: 10.1109/ICIS.2010.73.

Lee, J., Bagheri, B. and Kao, H. A. (2015) 'A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems', *Manufacturing Letters*. Society of Manufacturing Engineers (SME), 3, pp. 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.

Lobera, D. T. (2011) 'Measuring actual operating conditions of a photovoltaic power generator', (March).

Maxim Integrated (2015) *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer, Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (Acedido: 21 Julho 2017).

Mujumdar, U. B. and Tutkane, D. R. (2013) 'Development of integrated hardware set up for solar photovoltaic system monitoring', *2013 Annual IEEE India Conference, INDICON 2013*. doi: 10.1109/INDCON.2013.6725944.

Mukaro, R. and Carelse, X. F. (1999) ‘A microcontroller-based data acquisition system for solar radiation and environmental monitoring’, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48(6), pp. 1232–1238. doi: 10.1109/19.816142.

Papageorgas, P. *et al.* (2013) ‘Smart Solar Panels : In-situ monitoring of photovoltaic panels based on wired and wireless sensor networks’, *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 36, pp. 535–545. doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.062.

Sheng, Z. *et al.* (2013) ‘A survey on the ietf protocol suite for the internet of things: standards, challenges, and opportunities’, *IEEE Wireless Communications*, 20(6), pp. 91–98. doi: 10.1109/MWC.2013.6704479.


Shi, J. *et al.* (2011) ‘A survey of Cyber-Physical Systems’, *2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, WCSP 2011*. doi: 10.1109/WCSP.2011.6096958.

Texas Instruments (2017) *MSP430FR2433 Mixed-Signal Microcontroller*. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2433.pdf> (Acedido: 21 Julho 2017).

Texas Solutions (2017) *TSL235R Light-To-Frequency Converter*. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Imaging/TSL235R-LF.pdf> (Acedido: 21 Julho 2017).

Características dos sensores utilizados

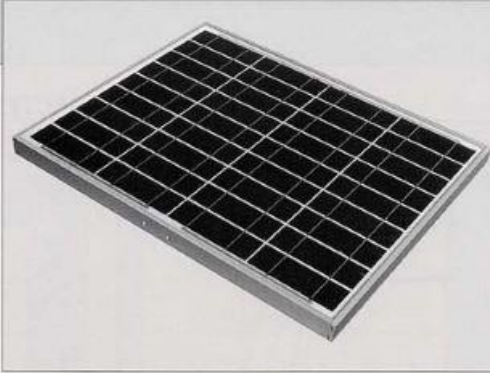
Módulo PV – KC40

KYOCERA

KC40

HIGH EFFICIENCY
MULTICRYSTAL
PHOTOVOLTAIC
MODULE

TYPICAL OUTPUT 40 Wp



MODEL KC40

HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities have produced a highly efficient multicrystal photovoltaic modules.

The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 14%.

These cells are encapsulated between a tempered glass cover and an EVA pottant with PVF back sheet to provide maximum protection from the severest environmental conditions.

The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.

APPLICATIONS

- Microwave/Radio repeater stations
- Electrification of villages in remote areas
- Medical facilities in rural areas
- Power source for summer vacation homes
- Emergency communication systems
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Navigation lighthouses, and ocean buoys

- Pumping systems for irrigation, rural water supplies and livestock watering
- Aviation obstruction lights
- Cathodic protection systems
- Desalination systems
- Recreational vehicles
- Railroad signals
- Sailboat charging systems

SPECIFICATIONS

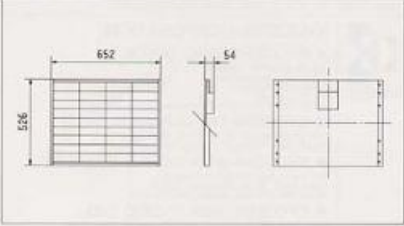
■ Electrical Specifications

MODEL	KC40
Maximum Power	40 Watts
Maximum Power Voltage	16.9 Volts
Maximum Power Current	2.34 Amps
Open Circuit Voltage	21.5 Volts
Short-Circuit Current	2.48 Amps
Length	526mm (20.7in.)
Width	652mm (25.7in.)
Depth	54mm (2.1in.)
Weight	4.5kg (9.9lbs.)

Note: The electrical specifications are under test conditions of irradiance of 1kW/m², Spectrum of 1.5 air mass and cell temperature of 25°C.
Kyocera reserves the right to modify these specifications without notice.

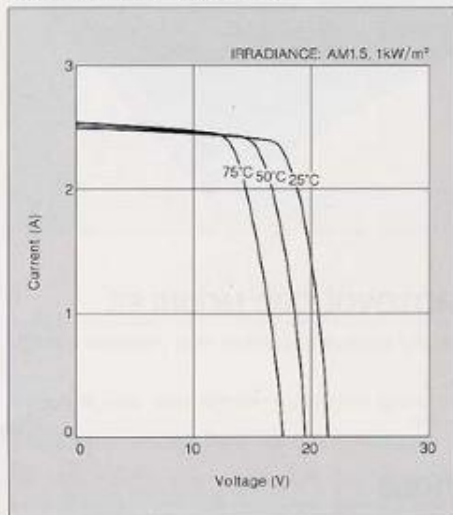
■ Physical Specifications

(Unit: mm)

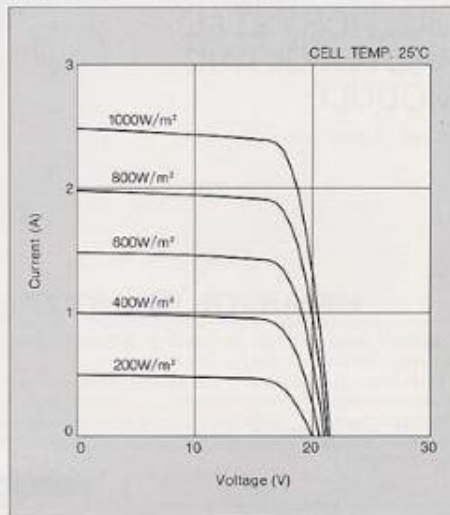


ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC40 at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC40 at various irradiance levels



QUALITY ASSURANCE

Kyocera multicrystal photovoltaic modules exceed government specifications for the following tests.

- Thermal cycling test
- Thermal shock test
- Thermal/Freezing and high humidity cycling test
- Electrical isolation test
- Hail impact test
- Mechanical, wind and twist loading test
- Salt mist test
- Light and water-exposure test
- Field exposure test

Please contact our office to obtain details without hesitation.



KYOCERA CORPORATION

■ KYOCERA HEAD OFFICE

SOLAR ENERGY DIVISION
5 Tanaka, Tobocho-cho
Fushimi-ku, Kyoto
612-0001 Japan
Phone: (81)75-604-3476 Telefax: (81)75-604-3475

● KYOCERA FINECERAMICS GmbH

Fritz Muller Strasse 107, D-73730 Esslingen, F.R.G.
Phone: (49)714-5363417 Telefax: (49)714-5363450

● KYOCERA ASIA PACIFIC PTE. LTD.

2981 Tiong Bahru Road, #13-03/05
Tiong Bahru Plaza, Singapore 148750
Phone: (65)271-0500 Telefax: (65)271-0500

● KYOCERA ASIA PACIFIC LTD.

Room 803, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,
Tsimshatsui East, Kowloon Hong Kong
Phone: (852)2-7237183 Telefax: (852)2-7244501

● KYOCERA ASIA PACIFIC LTD., TAIPEI BRANCH

Suite 501, Asia Enterprise Center,
No.142-144, Sec. 3, Min Chuan E. Road Taipei, Taiwan
Phone: (886)2-2715-3595 Telefax: (886)2-2715-3527

● Kyocera Solar, Inc.

7812 East Arizona Drive
Scottsdale, AZ 85260
Phone: (480)948-5003 or (800)223-9580 Telefax: (480)483-6431

● Kyocera Solar, Inc. -Sunelco Division

100 Skeels Street
P.O. Box 787
Hamilton, NY 12040
Phone: (405)363-8924 or (800)338-0944 Telefax: (405)363-6040

● Kyocera Solar Pty. Ltd.

36 Windsor Street, Unit 6
Stafford 4053
Queensland, Australia
Phone: (61)7-3856-5388 Telefax: (61)7-3856-5443

● Kyocera Solar Argentina S.A.

Maipo 2145, (B40) Martinez
Provincia de Buenos Aires
Argentina
Phone: (54)11-4836-1040 Telefax: (54)11-4836-1081

● Kyocera Solar do Brazil Ltda.

Energia Renovavel LTDA
Rua Mauricio de Costa Faria, 65
22780-280, Recreio, Rio de Janeiro, Brazil
Phone: (55)21-2437-8020 Telefax: (55)21-2437-2338

The contents of this catalog are subject to change without prior notice for further improvement.

(Recycled Paper)



Atmel 8-bit AVR Microcontroller with 2/4/8K Bytes In-System Programmable Flash

ATtiny25/V / ATtiny45/V / ATtiny85/V Summary

Features

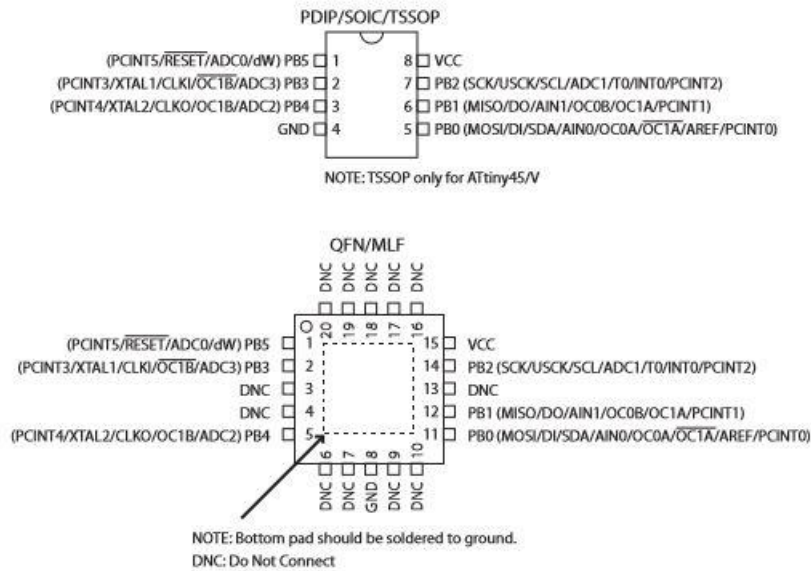
- High Performance, Low Power AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 120 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
- Non-volatile Program and Data Memories
 - 2/4/8K Bytes of In-System Programmable Program Memory Flash
 - Endurance: 10,000 Write/Erase Cycles
 - 128/256/512 Bytes In-System Programmable EEPROM
 - Endurance: 100,000 Write/Erase Cycles
 - 128/256/512 Bytes Internal SRAM
 - Programming Lock for Self-Programming Flash Program and EEPROM Data Security
- Peripheral Features
 - 8-bit Timer/Counter with Prescaler and Two PWM Channels
 - 8-bit High Speed Timer/Counter with Separate Prescaler
 - 2 High Frequency PWM Outputs with Separate Output Compare Registers
 - Programmable Dead Time Generator
 - USI – Universal Serial Interface with Start Condition Detector
 - 10-bit ADC
 - 4 Single Ended Channels
 - 2 Differential ADC Channel Pairs with Programmable Gain (1x, 20x)
 - Temperature Measurement
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
- Special Microcontroller Features
 - debugWIRE On-chip Debug System
 - In-System Programmable via SPI Port
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Low Power Idle, ADC Noise Reduction, and Power-down Modes
 - Enhanced Power-on Reset Circuit
 - Programmable Brown-out Detection Circuit
 - Internal Calibrated Oscillator
- I/O and Packages
 - Six Programmable I/O Lines
 - 8-pin PDIP, 8-pin SOIC, 20-pad QFN/MLF, and 8-pin TSSOP (only ATtiny45/V)
- Operating Voltage
 - 1.8 - 5.5V for ATtiny25V/45V/85V
 - 2.7 - 5.5V for ATtiny25/45/85
- Speed Grade
 - ATtiny25V/45V/85V: 0 – 4 MHz @ 1.8 - 5.5V, 0 - 10 MHz @ 2.7 - 5.5V
 - ATtiny25/45/85: 0 – 10 MHz @ 2.7 - 5.5V, 0 - 20 MHz @ 4.5 - 5.5V
- Industrial Temperature Range
- Low Power Consumption
 - Active Mode:
 - 1 MHz, 1.8V: 300 µA
 - Power-down Mode:
 - 0.1 µA at 1.8V

Rev. 2588QS-AVR-08/2013

2588QS-AVR-08/2013

1. Pin Configurations

Figure 1-1. Pinout ATtiny25/45/85



1.1 Pin Descriptions

1.1.1 VCC

Supply voltage.

1.1.2 GND

Ground.

1.1.3 Port B (PB5:PB0)

Port B is a 6-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.



PSoC® 5LP: CY8C58LP Family
Datasheet

Programmable System-on-Chip (PSoC®)

General Description

PSoC® 5LP is a true programmable embedded system-on-chip, integrating configurable analog and digital peripherals, memory, and a microcontroller on a single chip. The PSoC 5LP architecture boosts performance through:

- 32-bit ARM Cortex-M3 core plus DMA controller and digital filter processor, at up to 80 MHz
- Ultra low power with industry's widest voltage range
- Programmable digital and analog peripherals enable custom functions
- Flexible routing of any analog or digital peripheral function to any pin

PSoC devices employ a highly configurable system-on-chip architecture for embedded control design. They integrate configurable analog and digital circuits, controlled by an on-chip microcontroller. A single PSoC device can integrate as many as 100 digital and analog peripheral functions, reducing design time, board space, power consumption, and system cost while improving system quality.

Features

- Operating characteristics
 - Voltage range: 1.71 to 5.5 V, up to 6 power domains
 - Temperature range (ambient): -40 to 85 °C [1]
 - Extended temperature parts: -40 to 105 °C
 - DC to 80-MHz operation
 - Power modes
 - Active mode 3.1 mA at 6 MHz, and 15.4 mA at 48 MHz
 - 2-µA sleep mode
 - 300-nA hibernate mode with RAM retention
 - Boost regulator from 0.5-V input up to 5-V output
- Performance
 - 32-bit ARM Cortex-M3 CPU, 32 interrupt inputs
 - 24-channel direct memory access (DMA) controller
 - 24-bit 64-tap fixed-point digital filter processor (DFB)
- Memories
 - Up to 256 KB program flash, with cache and security features
 - Up to 32 KB additional flash for error correcting code (ECC)
 - Up to 64 KB RAM
 - 2 KB EEPROM
- Digital peripherals
 - Four 16-bit timer, counter, and PWM (TCPWM) blocks
 - I²C, 1 Mbps bus speed
 - USB 2.0 certified Full-Speed (FS) 12 Mbps peripheral interface (TID#10840032) using internal oscillator^[2]
 - Full CAN 2.0b, 16 Rx, 8 Tx buffers
 - 20 to 24 universal digital blocks (UDB), programmable to create any number of functions:
 - 8-, 16-, 24-, and 32-bit timers, counters, and PWMs
 - I²C, UART, SPI, I2S, LIN 2.0 interfaces
 - Cyclic redundancy check (CRC)
 - Pseudo random sequence (PRS) generators
 - Quadrature decoders
 - Gate-level logic functions
- Programmable clocking
 - 3- to 74-MHz internal oscillator, 1% accuracy at 3 MHz
 - 4- to 25-MHz external crystal oscillator
 - Internal PLL clock generation up to 80 MHz
 - Low-power internal oscillator at 1, 33, and 100 kHz
 - 32.768-kHz external watch crystal oscillator
 - 12 clock dividers routable to any peripheral or I/O
- Analog peripherals
 - Configurable 8- to 20-bit delta-sigma ADC
 - Up to two 12-bit SAR ADCs
 - Four 8-bit DACs
 - Four comparators
 - Four opamps
 - Four programmable analog blocks, to create:
 - Programmable gain amplifier (PGA)
 - Transimpedance amplifier (TIA)
 - Mixer
 - Sample and hold circuit
 - CapSense® support, up to 62 sensors
 - 1.024 V ±0.1% internal voltage reference
- Versatile I/O system
 - 46 to 72 I/O pins – up to 62 general-purpose I/Os (GPIOs)
 - Up to eight performance I/O (SIO) pins
 - 25 mA current sink
 - Programmable input threshold and output high voltages
 - Can act as a general-purpose comparator
 - Hot swap capability and overvoltage tolerance
 - Two USBIO pins that can be used as GPIOs
 - Route any digital or analog peripheral to any GPIO
 - LCD direct drive from any GPIO, up to 46 × 16 segments
 - CapSense support from any GPIO
 - 1.2-V to 5.5-V interface voltages, up to four power domains
- Programming, debug, and trace
 - JTAG (4-wire), serial wire debug (SWD) (2-wire), single wire viewer (SWV), and Traceport (5-wire) interfaces
 - ARM debug and trace modules embedded in the CPU core
 - Bootloader programming through I²C, SPI, UART, USB, and other interfaces
- Package options: 68-pin QFN, 100-pin TQFP, and 99-pin CSP
- Development support with free PSoC Creator™ tool
 - Schematic and firmware design support
 - Over 100 PSoC Components™ integrate multiple ICs and system interfaces into one PSoC. Components are free embedded ICs represented by icons. Drag and drop component icons to design systems in PSoC Creator.
 - Includes free GCC compiler, supports Keil/ARM MDK compiler
 - Supports device programming and debugging

Notes

1. The maximum storage temperature is 150 °C in compliance with JEDEC Standard JESD22-A103, High Temperature Storage Life.
2. This feature on select devices only. See Ordering Information on page 127 for details.

1. Overview

ESP32 is a single chip 2.4 GHz Wi-Fi and Bluetooth combo chip designed with TSMC ultra low power 40 nm technology. It is designed and optimized for the best power performance, RF performance, robustness, versatility, features and reliability, for a wide variety of applications, and different power profiles.

1.1 Featured Solutions

1.1.1 Ultra Low Power Solution

ESP32 is designed for mobile, wearable electronics, and Internet of Things (IoT) applications. It has many features of the state-of-the-art low power chips, including fine resolution clock gating, power modes, and dynamic power scaling.

For instance, in a low-power IoT sensor hub application scenario, ESP32 is woken up periodically and only when a specified condition is detected; low duty cycle is used to minimize the amount of energy that the chip expends. The output power of the power amplifier is also adjustable to achieve an optimal trade off between communication range, data rate and power consumption.

Note:

For more information, refer to Section 3.7 RTC and Low-Power Management.

1.1.2 Complete Integration Solution

ESP32 is the most integrated solution for Wi-Fi + Bluetooth applications in the industry with less than 10 external components. ESP32 integrates the antenna switch, RF balun, power amplifier, low noise receive amplifier, filters, and power management modules. As such, the entire solution occupies minimal Printed Circuit Board (PCB) area.

ESP32 uses CMOS for single-chip fully-integrated radio and baseband, and also integrates advanced calibration circuitries that allow the solution to dynamically adjust itself to remove external circuit imperfections or adjust to changes in external conditions.

As such, the mass production of ESP32 solutions does not require expensive and specialized Wi-Fi test equipment.

1.2 Basic Protocols

1.2.1 Wi-Fi

- 802.11 b/g/n/e/i
- 802.11 n (2.4 GHz), up to 150 Mbps
- 802.11 e: QoS for wireless multimedia technology
- WMM-PS, UAPSD
- A-MPDU and A-MSDU aggregation
- Block ACK

- Fragmentation and defragmentation
- Automatic Beacon monitoring/scanning
- 802.11 i security features: pre-authentication and TSN
- Wi-Fi Protected Access (WPA)/WPA2/WPA2-Enterprise/Wi-Fi Protected Setup (WPS)
- Infrastructure BSS Station mode/SoftAP mode
- Wi-Fi Direct (P2P), P2P Discovery, P2P Group Owner mode and P2P Power Management
- UMA compliant and certified
- Antenna diversity and selection

Note:

For more information, refer to Section 3.5 Wi-Fi.

1.2.2 Bluetooth

- Compliant with Bluetooth v4.2 BR/EDR and BLE specification
- Class-1, class-2 and class-3 transmitter without external power amplifier
- Enhanced power control
- +10 dBm transmitting power
- NZIF receiver with -98 dBm sensitivity
- Adaptive Frequency Hopping (AFH)
- Standard HCI based on SDIO/SPI/UART
- High speed UART HCI, up to 4 Mbps
- BT 4.2 controller and host stack
- Service Discover Protocol (SDP)
- General Access Profile (GAP)
- Security Manage Protocol (SMP)
- Bluetooth Low Energy (BLE)
- ATT/GATT
- HID
- All GATT-based profile supported
- SPP-Like GATT-based profile
- BLE Beacon
- A2DP/AVRCP/SPP, HSP/HFP, RFCOMM
- CVSD and SBC for audio codec
- Bluetooth Piconet and Scatternet

1.3 MCU and Advanced Features

1.3.1 CPU and Memory

- Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6 microprocessors, up to 600 DMIPS
- 448 KByte ROM
- 520 KByte SRAM
- 16 KByte SRAM in RTC
- QSPI Flash/SRAM, up to 4 x 16 MBytes
- Power supply: 2.2 V to 3.6 V

1.3.2 Clocks and Timers

- Internal 8 MHz oscillator with calibration
- Internal RC oscillator with calibration
- External 2 MHz to 40 MHz crystal oscillator
- External 32 kHz crystal oscillator for RTC with calibration
- Two timer groups, including 2 x 64-bit timers and 1 x main watchdog in each group
- RTC timer with sub-second accuracy
- RTC watchdog

1.3.3 Advanced Peripheral Interfaces

- 12-bit SAR ADC up to 18 channels
- 2 x 8-bit D/A converters
- 10 x touch sensors
- Temperature sensor
- 4 x SPI
- 2 x I2S
- 2 x I2C
- 3 x UART
- 1 host (SD/eMMC/SDIO)
- 1 slave (SDIO/SPI)
- Ethernet MAC interface with dedicated DMA and IEEE 1588 support
- CAN 2.0
- IR (TX/RX)
- Motor PWM
- LED PWM up to 16 channels
- Hall sensor
- Ultra low power analog pre-amplifier

1.3.4 Security

- IEEE 802.11 standard security features all supported, including WPA, WPA/WPA2 and WAPI
- Secure boot
- Flash encryption
- 1024-bit OTP, up to 768-bit for customers
- Cryptographic hardware acceleration:
 - AES
 - HASH (SHA-2) library
 - RSA
 - ECC
 - Random Number Generator (RNG)

1.3.5 Development Support

- SDK Firmware for fast on-line programming
- Open source toolchains based on GCC

Note:

For more information, refer to Chapter 7 Supported Resources.

1.4 Application

- Generic low power IoT sensor hub
- Generic low power IoT loggers
- Video streaming from camera
- Over The Top (OTT) devices
- Music players
 - Internet music players
 - Audio streaming devices
- Wi-Fi enabled toys
 - Loggers
 - Proximity sensing toys
- Wi-Fi enabled speech recognition devices
- Audio headsets
- Smart power plugs
- Home automation
- Mesh network

- Industrial wireless control
- Baby monitors
- Wearable electronics
- Wi-Fi location-aware devices
- Security ID tags
- Healthcare
 - Proximity and movement monitoring trigger devices
 - Temperature sensing loggers

1.5 Block Diagram

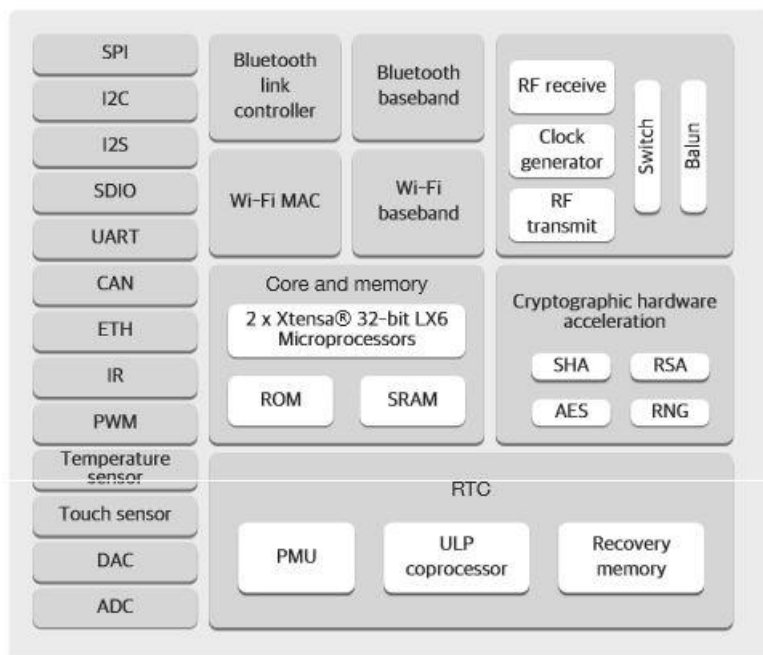


Figure 1: Function Block Diagram



**Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC
with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**

Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the new FILTER pin
- 5 μ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m Ω internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage



TUV America
Certificate Number:
USV 06 05 54214 010



Package: 8 Lead SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1

Description

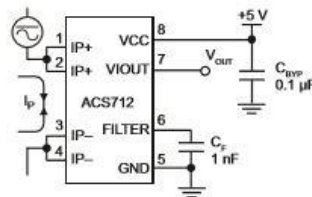
The Allegro™ ACS712 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switch-mode power supplies, and overcurrent fault protection. The device is not intended for automotive applications.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ($>V_{IOUT(Q)}$) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m Ω typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival of

Continued on the next page...

Typical Application



Application 1: The ACS712 outputs an analog signal, V_{OUT} , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current, I_P , within the range specified. C_F is recommended for noise management, with values that depend on the application.

DS18B20

DS18B20

Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

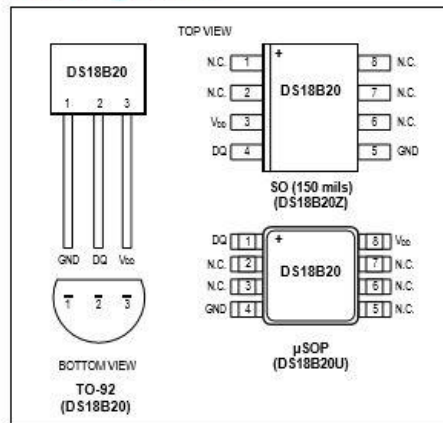
Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
 - Measures Temperatures from -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ (-67°F to $+257^{\circ}\text{F}$)
 - $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ Accuracy from -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$
 - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
 - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
 - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin μSOP , and 3-Pin TO-92 Packages

Pin Configurations



Ordering Information appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.

19-7487; Rev 4; 1/15



Absolute Maximum Ratings

Voltage Range on Any Pin Relative to Ground -0.5V to +6.0V
 Operating Temperature Range -55°C to +125°C

Storage Temperature Range -55°C to +125°C
 Solder Temperature Refer to the IPC/JEDEC
 J-STD-020 Specification.

These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

DC Electrical Characteristics

(-55°C to +125°C; $V_{DD} = 3.0V$ to $5.5V$)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{DD}	Local power (Note 1)	+3.0		+5.5	V
Pullup Supply Voltage	V_{PU}	Parasite power	+3.0		+5.5	V
		Local power (Notes 1, 2)	+3.0		V_{DD}	
Thermometer Error	t_{ERR}	-10°C to +85°C			±0.5	°C
		-55°C to +125°C (Note 3)			±2	
Input Logic-Low	V_{IL}	(Notes 1, 4, 5)	-0.3		+0.8	V
Input Logic-High	V_{IH}	Local power	+2.2		The lower of 5.5 or $V_{DD} + 0.3$	V
		Parasite power (Notes 1, 6)	+3.0			
Sink Current	I_L	$V_{IO} = 0.4V$	4.0			mA
Standby Current	I_{DDS}	(Notes 7, 8)		750	1000	nA
Active Current	I_{DD}	$V_{DD} = 5V$ (Note 9)		1	1.5	mA
DQ Input Current	I_{DQ}	(Note 10)		5		μA
Drift		(Note 11)		±0.2		°C

Note 1: All voltages are referenced to ground.

Note 2: The Pullup Supply Voltage specification assumes that the pullup device is ideal, and therefore the high level of the pullup is equal to V_{PU} . In order to meet the V_{IH} spec of the DS18B20, the actual supply rail for the strong pullup transistor must include margin for the voltage drop across the transistor when it is turned on; thus: $V_{PU_ACTUAL} = V_{PU_IDEAL} + V_{TRANSISTOR}$.

Note 3: See typical performance curve in [Figure 1](#).

Note 4: Logic-low voltages are specified at a sink current of 4mA.

Note 5: To guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as low as 0.5V.

Note 6: Logic-high voltages are specified at a source current of 1mA.

Note 7: Standby current specified up to +70°C. Standby current typically is 3μA at +125°C.

Note 8: To minimize I_{DDS} , DQ should be within the following ranges: $GND \leq DQ \leq GND + 0.3V$ or $V_{DD} - 0.3V \leq DQ \leq V_{DD}$.

Note 9: Active current refers to supply current during active temperature conversions or EEPROM writes.

Note 10: DQ line is high ("high-Z" state).

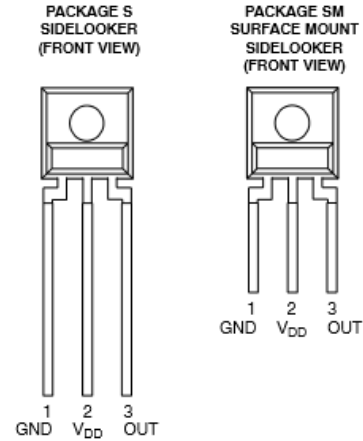
Note 11: Drift data is based on a 1000-hour stress test at +125°C with $V_{DD} = 5.5V$.



TSL235R LIGHT-TO-FREQUENCY CONVERTER

TAOS038E –SEPTEMBER 2007

- High-Resolution Conversion of Light Intensity to Frequency With No External Components
- Communicates Directly With a Microcontroller
- Compact Three-Leaded Clear-Plastic Package
- Single-Supply Operation Down to 2.7 V
- Nonlinearity Error Typically 0.2% at 100 kHz
- Stable 150 ppm/°C Temperature Coefficient
- Single-Supply Operation
- RoHS Compliant (–LF Package Only)



Description

The TSL235R light-to-frequency converter combines a silicon photodiode and a current-to-frequency converter on a single monolithic CMOS integrated circuit. Output is a square wave (50% duty cycle) with frequency directly proportional to light intensity (irradiance) on the photodiode. The digital output allows direct interface to a microcontroller or other logic circuitry. The device has been temperature compensated for the ultraviolet-to-visible light range of 320 nm to 700 nm and responds over the light range of 320 nm to 1050 nm. The TSL235R is characterized for operation over the temperature range of –25°C to 70°C and is supplied in a 3-lead clear plastic side-looker package with an integral lens. When supplied in the lead (Pb) free package, the device is RoHS compliant.

Functional Block Diagram



Available Options

DEVICE	T _A	PACKAGE – LEADS	PACKAGE DESIGNATOR	ORDERING NUMBER
TSL235R	–25°C to 70°C	3-lead Sidelooker	S	TSL235R
TSL235R	–25°C to 70°C	3-lead Sidelooker—Lead (Pb) Free	S	TSL235R–LF
TSL235R	–25°C to 70°C	3-lead Surface-Mount Sidelooker—Lead (Pb) Free	SM	TSL235RSM–LF

Terminal Functions

TERMINAL NAME	NO.	TYPE	DESCRIPTION
GND	1		Power supply ground (substrate). All voltages are referenced to GND.
OUT	3	O	Output frequency.
V _{DD}	2		Supply voltage.

The LUMENOLOGY® Company

Copyright © 2007, TAOS Inc.

Texas Advanced Optoelectronic Solutions Inc.
1001 Klein Road • Suite 300 • Plano, TX 75074 • (972) 673-0759
www.taosinc.com

1